Jenseits des Quants

Eine populäre Quantenphysik

Von
Leonid I. Ponomarjow

AULIS VERLAG DEUBNER & CO KG

Titel der Originalausgabe:

Л. ПОНОМАРЕВ. „По ту сторону кванта".
Издательство „Молодая гвардия", Москва

In die deutsche Sprache übertragen von Leo Korniljew
und Dr. Horst Braeter

Best.-Nr. 6015
1. für den Aulis Verlag veranstaltete Auflage
© 1974 Verlag MIR, Moskau und Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin
Lizenzausgabe für den AULIS VERLAG DEUBNER & CO KG,
Köln 1977
ISBN 3-7614-0229-5

Inhalt

Vorwort des Autors	6
Plancks große Entdeckung	7
Die Fakten sprechen für das Atom	30
Der endgültige Sieg	54
Die Modelle des Atoms	81
Mendelejew schafft Ordnung	105
Die Matrizen Heisenbergs	129
Nichts als Wellen	148
Welle und Teilchen zugleich	170
Eine grundlegende Formel	192
Vorschriften für den Zufall	211
Quantentheorie und Wirklichkeit	235
Die Praxis ist der Prüfstein	255
Schlußwort	279

Vorwort des Autors

Hartnäckig hält sich die Meinung, in der Wissenschaft gäbe es Dinge, die man einem Anfänger nicht erklären könne, während es zugleich fast peinlich sei, mit einem Eingeweihten darüber zu reden. Diese Ansicht kommt immer dann auf, wenn der Versuch zur Erklärung der Atomstruktur gemacht wird. Vielleicht ist auch deshalb bisher kein Buch über die Quantenmechanik geschrieben worden, hinreichend exakt, um den Kenner nicht zu verärgern, und zugleich einfach genug, um den Neuling nicht abzuschrecken, und das obendrein interessant für beide wäre.

Für Fachleute ist dieses Buch also nicht gedacht, obwohl auch sie darin einige unerwartete Tatsachen finden werden. Das Buch wendet sich an alle, die die allgemeinbildende Schule abzuschließen im Begriff sind, und an jeden, der versucht, die Welt unter einem etwas breiteren Blickwinkel zu betrachten, als es die berufliche Ausbildung erlaubt, die notwendigerweise speziell sein muß, damit sie produktiv sein kann.

Die Geschichte des Atoms wird hier durchaus streng erläutert. Doch diese Exaktheit ist kein Selbstzweck: In der Regel interessieren uns nicht nur die Fakten, sondern auch ihre Interpretation und die Umstände, unter denen sie entdeckt wurden. Das wichtigste Anliegen dieses Buches ist es, die Entwicklung der Ideen und Begriffe der Atomphysik zu schildern, die zur Ausbildung eines einfachen und harmonischen Systems führten. Gerade seine innere Schönheit war der Anlaß dafür, daß ich dieses Buch schrieb. Und wenn es mir gelang, daß der Leser die Kraft der logischen Konstruktionen der Quantenmechanik begreift und die Schönheit ihrer unerwartet einfachen Folgerungen empfindet, dann ist meine Arbeit nicht vergebens gewesen.

Plancks große Entdeckung

Nur selten vermag jemand auf die Frage »Was ist Quantenmechanik?« eine vernünftige Antwort zu geben. Die meisten Menschen sind davon überzeugt, daß die Quantenmechanik eine sehr schwierige Wissenschaft ist. Diese Auffassung ist zwar unbegründet, und doch hat es wohl seine Bewandtnis damit, daß sie sich so hartnäckig behauptet. Die Denkweise der Quantenmechanik ist im Grunde genommen einfach. Jedoch muß man, um mit ihr vertraut zu werden, zuvor einige Begriffe verstehen lernen, die auf den ersten Blick nichts Gemeinsames miteinander haben. Auch in ein System lassen sich diese Begriffe nicht ohne weiteres einordnen; es gelingt erst nach langen Vergleichen und Überlegungen. Dazu muß Zeit und Kraft aufgewendet werden.

Wenn man nur so viel von der Quantenmechanik weiß, daß sie »... das jahrhundertealte Rätsel der geheimnisvollen ‚Mikrowelt' löste«, oder daß sie »... zur Umwälzung unserer gesamten Weltanschauung beitrug«, dann kennt man etwa genausoviel davon wie Touristen von einem fremden Land, in dem sie umherreisen, ohne zuvor dessen Kultur und Sprache studiert zu haben. Gewiß, ringsumher beobachten sie Leute, die eilig ihres Weges gehen, die lachen oder winken, doch die Motive ihrer Bewegungen sind den Touristen unbekannt, und ihre Freude ist ihnen unverständlich. So bleiben nur die leuchtenden Reklameschilder in einer unbekannten Sprache im Gedächtnis haften.

Die Quantenmechanik ist wie ein großes Land mit reicher, tief verwurzelter Kultur. Um sie zu verstehen, muß man zunächst ihre Sprache studieren. Die Sprache der Quantenmechanik mag merkwürdig erscheinen, sie unterscheidet sich jedoch im Grunde genommen nicht von irgendeiner beliebigen Fremdsprache. Wie jede Sprache kann auch sie nicht durch bloße Willensanstrengung beherrscht werden, vielmehr ist ein systematisches Herangehen unerläßlich. Für den Anfang muß man sich nur einige Begriffe einprägen und versuchen, aus diesen Begriffen einfache

Sätze zu bilden, ohne zunächst besonderen Wert auf die Strenge der grammatischen Konstruktionen zu legen. Erst später gewinnt man jene Leichtigkeit und Sicherheit der Sprachbeherrschung, die uns das Gefühl der Befriedigung und die Freude über das erworbene Wissen vermittelt.

Das Studium der Quantenmechanik erinnert wohl ein wenig an den Vorgang, den man beim Auflösen von Salz in Wasser beobachtet: Zunächst verschwinden die Körnchen, die man ins Wasser wirft, spurlos, doch dann tritt der Zeitpunkt ein, in dem es genügt, nur noch ein einziges Körnchen in die Lösung zu werfen, damit an diesem kleinen Keim allmählich ein regulärer Kristall zu wachsen beginnt.

Wir wollen hier den Quellen, Ideen und Entdeckungen der Quantenmechanik nachgehen, das System ihrer Begriffe und Symbole erklären, um schließlich über ihre Anwendungen zu sprechen. Für den Anfang müssen wir uns einige Elementarbegriffe aneignen, ohne die keine einzige sinnvolle Aussage über die Quantenmechanik und ihre Ergebnisse formuliert werden kann. Das ist manchmal mühsam. Aber auch vor einem Flug in den Weltraum muß ein Kosmonaut Trainingsläufe absolvieren, in die Hocke springen und sich in der Zentrifuge umherwirbeln lassen. »Damit sich ein Muskel entwickelt, muß er ermüden«, pflegte der berühmte Physiologe Setschenow zu sagen. Wer allerdings die Ermüdung scheut, wird nie die Erregung des Suchens, die Freude des Entdeckens und jenes unbefangene Interesse für Nebensächlichkeiten verstehen können, aus dem im Grunde genommen nicht nur die Quantenmechanik, sondern die Wissenschaft überhaupt entstand.

Wir haben das alles natürlich nicht gesagt, um den Leser bereits am Anfang des Weges mit den zu erwartenden Schwierigkeiten zu erschrecken, aber es gibt nun einmal noch keine Tabletten, die man abends einnehmen könnte, um morgens als Physikprofessor zu erwachen. Für den Anfang wollen wir drei Begriffe verstehen lernen, die der gesamten Atomphysik zugrunde liegen: Atom, Strahl und Quant.

Die Atome

Was also ist die Quantenmechanik? Die Quantenmechanik ist die Wissenschaft vom Bau und von den Eigenschaften atomarer Objekte und Erscheinungen.

An dieser Definition stimmt alles, und doch ist ihre Nutzlosigkeit offenkundig, solange wir einige Begriffe nicht erklärt haben. Was bedeuten denn eigentlich die Worte »Eigenschaften atomarer Objekte«, d.h. der Atome?

Ginge es um eine reife Melone, dann würde diese Frage nicht aufkommen; ihre Eigenschaften sind unseren fünf Sinnen zugänglich: Die Melone ist rund, schwer, saftig, sie strömt einen Duft von Frische aus, und wenn man sie mit dem Messer zerschneidet, dann läßt sich ein knirschendes Geräusch vernehmen. Was aber ist mit den Atomen (aus denen übrigens auch diese Melone besteht)? Man kann sie weder unmittelbar sehen noch anfassen. Das bedeutet natürlich nicht, daß es die Atome überhaupt nicht gibt, sondern es zeigt nur, daß sie andere Eigenschaften als eine unversehrte Melone besitzen.

Fast jeder Mensch verbindet mit dem Begriff »Atom« rein intuitiv die Vorstellung von etwas Kleinem und Unteilbarem. Trotzdem müssen wir fragen: Welchen Sinn legt die moderne Physik in den Begriff »Atom«? Wie ist dieser Begriff entstanden, was stellte man sich in der Vergangenheit darunter vor, wie hat er sich in der Folgezeit entwickelt, und warum vermochte erst die Quantenmechanik ihm einen realen Inhalt zu geben?

Als Begründer der Atomidee gilt allgemein Demokrit (um 460—370 v.u.Z.), obwohl die Geschichte auch seinen Lehrer Leukipp aus Milet und z.B. den altindischen Philosophen Kanāda erwähnt, der kurz vor unserer Zeitrechnung lebte. (»Kanāda« bedeutet in der Übersetzung aus dem Sanskrit soviel wie »Verschlinger der Atome«.) Nach Kanādas Meinung führt die unendliche Teilbarkeit der Materie zu absurden Schlußfolgerungen. Gäbe es sie, wäre das Senfkorn dem Berge gleich, weil »... das Unendliche stets gleich dem Unendlichen ist«. Das kleinste Teilchen in der Natur, so lehrte Kanāda, ist das Staubkorn im Sonnenstrahl. Es besteht aus sechs Atomen, von denen jeweils zwei zu einem Paar verknüpft sind »nach dem Willen Gottes oder nach wessen Willen auch immer«.

Über Demokrit selbst wissen wir nur wenig. Bekannt ist, daß er in der ionischen Kolonie Abdera am thrakischen Gestade des Mittelmeeres geboren wurde. Außer Leukipp waren die Chaldäer und die persischen Magier seine Lehrer; er war viel gereist und besaß ein großes Wissen. Im

Jahre 370 v.u.Z. starb er im Alter von etwa hundert Jahren.

Die Legende berichtet, Demokrit habe einstmals, einen Apfel in der Hand haltend, auf einem Stein am Meer gesessen und folgende Überlegungen angestellt: »Wenn ich diesen Apfel jetzt in der Mitte durchschneide und eine Hälfte aufesse, behalte ich eine Apfelhälfte übrig. Verfahre ich mit dieser Hälfte ebenso, bleibt ein Viertel des Apfels übrig. Wenn ich mit der Teilung fortfahre, wird dann das in meiner Hand Zurückbleibende — ein Achtel, ein Sechzehntel usw. — stets ein Teil des Apfels sein? Oder wird die Teilung einmal dazu führen, daß der zurückbleibende Teil nicht länger die Eigenschaften des Apfels besitzt?«

Später zeigte es sich, daß Demokrits Überlegung ein gutes Stück Wahrheit enthielt. Nach langem Nachdenken gelangte der Philosoph zu dem Schluß, daß eine derartige Teilbarkeitsgrenze existiert und bezeichnete dieses letzte, nicht mehr teilbare Partikel als Atom. Lesen Sie einmal das, was vor über 2000 Jahren niedergeschrieben worden ist!

»Der Ursprung des Alls sind die Atome und die Leere. Alles übrige existiert nur in der Wahrnehmung. Es gibt eine unzählige Menge von Welten, und sie haben einen Anfang und ein Ende in der Zeit. Und sie entstehen nicht aus dem Nichts und verschwinden auch nicht im Nichts. Die Atome sind nicht abzählbar nach Größe und Menge, sie fliegen durch das Weltall, bilden Wirbel, und so entsteht alles Komplizierte: das Feuer, das Wasser, die Luft und die Erde. Diese entstehen durch Verbindung einiger Atome. Die Atome hingegen lassen sich in keiner Weise beeinflussen und sind unveränderlich wegen ihrer Festigkeit.«

Demokrit konnte seine Behauptungen nicht beweisen. Er konnte nur hoffen, daß man ihm Glauben schenkt. Doch man glaubte ihm nicht. Vor allem Aristoteles, sein bedeutender Zeitgenosse, lehrte gerade das Gegenteil: Der Teilungsprozeß läßt sich — zumindest im Prinzip — unendlich lange fortsetzen. Diese Lehre setzte sich durch. Demokrits Ideen dagegen gerieten für viele Jahrhunderte in Vergessenheit, seine Werke wurden vernichtet. Sie blieben nur in Fragmenten und Zeugnissen seiner Zeitgenossen erhalten.

Erst nach 2000 Jahren sollte es sich beweisen, daß Demokrit mit seinen Überlegungen den richtigen Weg eingeschlagen hatte. Im 17. Jahrhundert entstand erstmals die Physik als Wissenschaft. Sie verdrängte die alte Naturphilosophie, denn sie stützte sich keineswegs auf rein gedankliche Konstruktionen, sondern auf das Experiment und auf die Mathematik. Man begann die den Menschen umgebende Natur zu erforschen: Im Gegensatz zur früheren bloßen Beobachtung wurden nun ganz bewußt Experimente zur Überprüfung von Hypothesen unternommen und die Ergebnisse in Form von Zahlen festgehalten. Aristoteles' Lehre hielt dieser Kontrolle nicht stand. Demokrits Hypothese hingegen behauptete sich, wenn auch von ihrer ursprünglichen Gestalt — wie wir im weiteren sehen werden — fast nichts übrigblieb.

Nach zwei Jahrtausenden erweckte der französische Philosoph und Aufklärer Pierre Gassendi (1592—1655) die Atomidee zu neuem Leben. Dafür war er den Verfolgungen der Kirche ausgesetzt, die jedes Abweichen von ihrem starren Dogma — ob in Form von Hypothesen oder von exakt bewiesenen Lehrsätzen — bekämpfte. Dennoch wurde die Atomhypothese von allen führenden Gelehrten jener Zeit anerkannt. Selbst Isaac Newton (1643—1727) mit seiner berühmten Devise »hypothesis non fingo« (»Ich erfinde keine Hypothesen«) schenkte der Atomhypothese Glauben und gab eine eigene Darstellung davon im dritten Band der »Optik«.

Solange die Hypothese von der Atomen allerdings nicht durch den Versuch bestätigt worden war, blieb sie trotz ihrer Anziehungskraft nur eine Hypothese.

Den ersten anschaulichen Beweis dafür, daß Demokrit und nicht Aristoteles recht hatte, fand der schottische Botaniker Robert Brown (1773—1858). In seiner Jugend hatte er vier Jahre mit Expeditionen in Australien zugebracht, deren Ausbeute in einer Sammlung von etwa 4000 Pflanzenarten bestand. Zwanzig Jahre später befaßte er sich noch immer mit der Auswertung des Gesammelten.

Im Sommer 1827 wurde Brown darauf aufmerksam, daß in Wasser verteilter feinster Blütenstaub unter der Einwirkung einer unbekannten Kraft willkürliche Bewegungen ausführt. Er veröffentlichte darüber einen Artikel mit folgender Überschrift: »Kurzer Bericht über mikroskopische Beobachtungen an Partikeln, die im Blütenstaub

von Pflanzen enthalten sind, angestellt im Juni, Juli und August 1827, sowie über die Existenz aktiver Moleküle in organischen und anorganischen Körpern.«

Sein Versuch löste zunächst Befremden aus. Brown selbst trug dazu bei, indem er die Bewegung als Ausdruck einer »lebenden Kraft« zu erklären suchte, die organische Moleküle angeblich besitzen. Diese Deutung der »Brownschen Bewegung« befriedigte die Wissenschaftler natürlich nicht, und so unternahmen sie immer neue Versuche zu ihrer Erklärung. Besonders gründlich befaßten sich der Holländer Carbonelle (1880) und der Franzose Gouy (1888) mit diesem Problem. Sie stellten sorgfältige Versuche an und fanden heraus, daß die Brownsche Bewegung von äußeren Einwirkungen unabhängig ist; sie bleibt unbeeinflußt von der Jahres- und Tageszeit, dem Zusatz von Salzen, der Art des Blütenstaubes und »... läßt sich gleichermaßen gut in der Nacht auf einem kleinen Dorf oder tags in der Nähe einer von Menschen überfüllten Straße, die von schweren Fuhrwerken benutzt wird, beobachten«. Sie hängt auch nicht von der Form der Partikeln ab, sondern nur von ihrer Größe; das Wichtigste aber ist, daß die Bewegung niemals aufhört.

Hier müssen wir bemerken, daß diese merkwürdige Bewegung zunächst keineswegs die notwendige Aufmerksamkeit fand. Die meisten Physiker wußten überhaupt nichts davon. Wer aber etwas wußte, hielt die Erscheinung für uninteressant und meinte, daß es sich um einen analogen Effekt zur Bewegung von Staubpartikeln im Sonnenstrahl handele. Erst vierzig Jahre später entstand der Gedanke, daß die im Mikroskop sichtbaren ungeordneten Bewegungen des Blütenstaubes durch Zusammenstöße dieser Partikeln mit kleinen, unsichtbaren Flüssigkeitspartikeln verursacht werden. Nach den Arbeiten von Gouy war es nun soweit: Die Hypothese von den Atomen gewann viele Anhänger.

Natürlich waren auch vor Brown nicht wenige Leute davon überzeugt, daß alle Körper aus Atomen aufgebaut sind. Sie sprachen den Atomen auch ohne weitere Untersuchungen gewisse Eigenschaften zu. In der Tat haben alle Körper in der Natur, ungeachtet der ungeheuren Unterschiede, die es zwischen ihnen gibt, Masse und Volumen. Also mußten offenbar auch ihre Atome Masse und Volumen besitzen. Genau diese Eigenschaften legte ein Lehrer

für Mathematik und Naturphilosophie in der Stadt Manchester seinen Überlegungen zugrunde; es war John Dalton (1766—1844), ein bedeutender Gelehrter, der die Entwicklung der Chemie für rund hundert Jahre entscheidend beeinflußte.

Die Anhänger der Atomistik warfen allerdings sogleich folgende Frage auf: Bedeutet die Vielfalt der Körper nicht eine ebenso große Vielfalt der Atome, wie es Demokrit behauptet hatte? Es zeigte sich, daß dies nicht zutrifft. Dalton formulierte nach sorgfältiger Untersuchung chemischer Reaktionen im Jahre 1808 erstmals in eindeutiger Form den Begriff des chemischen Elements: Ein Element ist ein Stoff, der aus Atomen ein und desselben Typs besteht.

Allzu viele Elemente gab es nämlich gar nicht, wie sich bald herausstellte: Zu jener Zeit kannte man etwa vierzig (heute dagegen 106). Alle übrigen Stoffe sind aus Molekülen — verschiedenartigen Atomkombinationen — aufgebaut. Aber auch die Atome der verschiedenen Elemente unterscheiden sich voneinander. Einen dieser Unterschiede fand man recht schnell heraus: Es war die Atommasse. Setzt man das Atomgewicht (genauer die Atommasse) des leichtesten Gases, nämlich des Wasserstoffs, gleich 1, dann kann man mit Hilfe dieser Einheit die Atomgewichte (genauer die Atommassen) aller übrigen Elemente ausdrücken. Das Atomgewicht (genauer die relative Atommasse) des Sauerstoffs ist dann gleich 16, das des Eisens entspricht 56 usw. So fanden erstmals Zahlen Eingang in die Wissenschaft vom Atom — ein Ereignis von ungewöhnlicher Bedeutung.

Nach wie vor aber war über die absolute Größe und Masse der Atome nichts bekannt.

Einer der ersten wissenschaftlichen Versuche, die Größe der Atome abzuschätzen, geht auf Michail Wassiljewitsch Lomonossow (1711—1765) zurück. Im Jahre 1742 bemerkte er, daß kunstfertige Goldschmiede imstande sind, Goldblättchen bis zu einer Dicke von einem zehntausendstel Zentimeter (10^{-4} cm) auszuwalzen. Demnach konnten die Goldatome unter keinen Umständen einen größeren Durchmesser haben. 1773 bemerkte Benjamin Franklin (1706 bis 1790), daß sich ein Teelöffel Öl (mit einem Volumen von etwa 5 cm^3) beim Ausgießen auf eine ruhige Wasserfläche gleichmäßig über eine Fläche von ungefähr 2000 m^2 oder $2 \cdot 10^7$ cm^2 ausbreitet. Der Moleküldurchmesser kann in

diesem Fall offenbar nicht größer sein als der Wert

$$d = \frac{5\ \text{cm}^3}{2 \cdot 10^7\ \text{cm}^2} = 2{,}5 \cdot 10^{-7}\ \text{cm},$$

d.h., er ist kleiner als der dreimillionste Teil eines Zentimeters.

Als erster erfolgreicher Versuch zur Abschätzung von Größe und Masse der Atome muß die Arbeit des Physikdozenten an der Wiener Universität Joseph Loschmidt (1821—1895) angesehen werden. Im Jahre 1865 fand er, daß die Größe aller Atome ungefähr gleich ist und 10^{-8} cm beträgt, während die Masse eines Wasserstoffatoms nur 10^{-24} g ausmacht.

Hier begegnen wir zum ersten Male derartig kleinen Größen, und es fällt uns schwer, sie zu erfassen. Unser Sprachschatz kennt allenfalls solche Wendungen wie »leicht wie eine Flaumfeder« oder »dünn wie ein Spinnengewebe«. Und obwohl eine Unze Spinnengewebe ausreichte, um einen Faden über den Atlantik zu spannen, ist sie doch wägbar. Die Dicke eines Spinnwebfadens ist noch immer millionenfach größer als der Atomdurchmesser. Um nun diesen Abgrund zwischen dem »gesunden Menschenverstand« und der Winzigkeit dieser Größen wenigstens etwas zu überbrücken, nimmt man gewöhnlich Zuflucht zu Vergleichen.

Nähme man ein Atom und eine Kirsche mit dem Durchmesser von 1 cm und ließe beide gleichzeitig immer größer werden, dann würde unser Atom nach Masse und Größe gerade einer Melone ähneln, während die Kirsche bereits die Größe der Erdballs erreicht hätte.

Allerdings ist der Wert solcher Vergleiche allem Anschein nach äußerst gering, da der Begriff »Maß« als der einer Größe, die durch Anlegen eines Maßstabes gemessen wird, für derart kleine Objekte seinen ursprünglichen Sinn verliert. Daher ist es besser, auf alle Versuche, sich derartige Zahlen anschaulich vorzustellen, von vornherein zu verzichten. Die Atomzahlen sind keineswegs willkürlich gewählt: Wichtig ist es, zu begreifen, daß man den Atomen wirklich diese geringen Durchmesser und Massen zuschreiben muß, damit die Eigenschaften der Stoffe, die aus solchen Atomen bestehen, sich so ergeben, wie wir sie in der Natur beobachten.

Loschmidt ermittelte die Zahlen bei der Untersuchung der wechselseitigen Gasdiffusion, d.h. der Fähigkeit von

Gasen, sich miteinander zu vermischen, wenn sie sich berühren. Diese Erscheinung ist uns allen bekannt, wenn wir den Schritt verhalten, um den Geruch frischgemähten Grases einzuatmen. Loschmidt benutzte bei seinen Überlegungen die molekularkinetische Hypothese, d.h. eine Annahme, derzufolge die Gase nicht aus Molekülen schlechthin, sondern aus sich bewegenden Molekülen bestehen. Mit Hilfe der kinetischen Gastheorie ermittelte er auch den mittleren Abstand zwischen den Molekülen in einem Gas, dieser beträgt etwa das Zehnfache des Atomdurchmessers.

Kondensiert man Gas zu einer Flüssigkeit, dann verringert sich das Volumen auf etwa ein Tausendstel des ursprünglichen Wertes, und die Abstände zwischen den Atomen müssen sich demnach auf ein Zehntel reduzieren. In Flüssigkeiten und festen Körpern müssen die Atome daher dicht aneinandergepreßt sein. Trotzdem stellen sie ihre Bewegung nicht ein; sie ist jetzt nur gehemmt und folgt anderen Gesetzen als den Bewegungsgesetzen der Gasmoleküle.

Die Zahl der Gasmoleküle in 1 cm^3 bei Normaldruck und der Temperatur schmelzenden Eises

$$L = 2{,}688408 \cdot 10^{19}\ cm^{-3}$$

ist heute mit hoher Genauigkeit bekannt und heißt Loschmidtsche Zahl. Sie beträgt ungefähr das Zehnfache des ursprünglich von Loschmidt ermittelten Wertes.

Die Strahlen

Eisen besteht, wie auch jeder andere Stoff, aus Atomen. Steckt man das Ende einer Eisenstange in den Ofen, dann beginnt sich die Stange zu erwärmen. Vom Standpunkt der kinetischen Theorie bedeutet dies, daß sich die Eisenatome rascher bewegen. Man kann das feststellen, wenn man das andere Ende der Stange mit den Fingern berührt. Wärme ist also die kinetische Energie der sich bewegenden Atome. Aber das ist bei weitem nicht alles.

Beim Erhitzen der Eisenstange beobachten wir eine erstaunliche Erscheinung: Mit zunehmender Temperatur ändert sich allmählich die Farbe des erhitzten Eisens; vom Kirschrot verwandelt sie sich in blendendes Weiß. Jetzt kann man nicht einmal mehr nahe an die Eisenstange

herangehen, ganz zu schweigen von einer Berührung. Diese Erscheinung ist allerdings unverständlich, wenn man sich zu ihrer Erklärung ausschließlich der Vorstellung von der Bewegung der Atome bedient. In der Tat: Wir berühren die Stange nicht. Die Eisenatome haben mit unseren Fingern keinen Kontakt. Warum ist es uns dann warm geworden?

Hier müssen wir einen neuen Begriff einführen, der auf den ersten Blick keinerlei Verbindung mit der Idee vom Atom aufweist. Es ist der Begriff Strahlung.

Wir sagen zum Beispiel: Hell strahlt die Sonne. Das Licht ist ja eine Strahlung. Wir sagen aber auch, daß wir uns in den Sonnenstrahlen wärmen. Also kann sich auch die Wärme in Form von Strahlen ausbreiten. Ständig haben wir es mit der Strahlung zu tun, sei es am Lagerfeuer, beim Beobachten des Abendrots, beim Einstellen eines Rundfunkempfängers oder beim Röntgen. Alle Strahlungsarten — Wärme, Licht, Funkwellen und Röntgenstrahlen — sind unterschiedliche Erscheinungsformen ein und derselben elektromagnetischen Strahlung. Trotzdem unterscheiden wir die verschiedenen Strahlungsarten nicht nur qualitativ und subjektiv, sondern auch streng quantitativ. Doch nach welchem Merkmal? Die elektromagnetische Strahlung hat viele Merkmale, doch eines ist jetzt besonders wichtig für uns — ihre Wellennatur.

Den Begriff »Welle« wollen wir im folgenden kurz erläutern, denn er ist eines der wichtigsten Wörter in der Physik.

Jeder stellt sich die Welle anders vor: Der eine sieht vor seinem geistigen Auge die Welle, die ein ins Wasser geworfener Stein erzeugt, ein anderer dagegen die Sinuskurve. Da sich eine Sinuskurve leichter darstellen läßt, wollen wir sie hier benutzen. Diese schematische Welle besitzt vier Eigenschaften: die Amplitude A, die Wellenlänge λ, die Frequenz ν und die Ausbreitungsgeschwindigkeit v.

Die Amplitude einer Welle ist ihr größter absoluter Wert. Die Wellenlänge wird in der Zeichnung erläutert. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit bedarf offenbar keiner besonderen Erklärungen.

Um den Begriff »Frequenz« zu verstehen, wollen wir die Bewegung der Welle im Verlauf einer Sekunde betrachten. In dieser Zeit legt die Welle eine Entfernung von v Zen-

timetern zurück (d.h., ihre Geschwindigkeit ist gleich v cm/s). Wenn wir abzählen, wieviel Wellenlängen in diesem Abschnitt Platz finden, ermitteln wir die Frequenz der Welle (bzw. der Strahlung): $\nu = v/\lambda$.

Die wichtigste Eigenschaft der Wellen ist ihre Fähigkeit zur Interferenz. Was ist darunter zu verstehen?

Stellen Sie sich folgende Situation vor: Sie werfen Erbsen mit aller Kraft an eine Wand, und zwar so, daß die Erbsen verhältnismäßig weit von der Wand zurückprallen. Weiterhin soll angenommen werden, daß das Werfen gleichmäßig erfolgt, z.B. so, daß in 1 s genau 8 Erbsen auf 1 cm² der Wand auftreffen. Wenn wir die Erbsen, die die Fläche von 1 cm² in beiden Richtungen durchfliegen, zählen, stellen wir fest, daß es immer 16 sind.

Was aber ist, wenn an dieser Wand eine Welle reflektiert wird?

Wir wollen die folgende Zeichnung aufmerksam betrachten: Zunächst breitet sich die Welle ungehindert nach rechts (A) aus; dann erreicht sie die Wand und wird reflektiert (B). Wir werden allerdings nicht zwei getrennte Wellen zu sehen bekommen, sondern die Überlagerung beider Wellen, der einlaufenden und der reflektierten Welle. Das Ergebnis hängt davon ab, wie die Welle auf die Wand auftrifft (C). Gelegentlich fällt sie so ein, daß sie sich selbst vollständig auslöscht (D, E). Diese Fähigkeit der Welle, sich selbst auszulöschen, heißt Interferenz. Nach diesem Merkmal kann man eine Welle stets eindeutig von einem Partikelstrom unterscheiden.

Es gibt noch eine weitere Eigenschaft der Welle, die sie von den Partikeln unterscheidet, nämlich die Beugung. Darunter versteht man, grob gesagt, die Fähigkeit der Welle, ein Hindernis zu umgehen, wenn die Ausmaße des Hindernisses mit der Wellenlänge vergleichbar sind. Wenn aber das Hindernis klein ist, dann kann sich die Welle beim Auftreffen dank der Beugung in zwei Wellen aufspalten, es zu beiden Seiten umgehen, und beide Wellen können sich dann durch Überlagerung gegenseitig genauso auslöschen wie bei der Überlagerung von einlaufender und reflektierter Welle.

Mit diesem Nachweis der Interferenz und Beugung von Röntgenstrahlen und anderen Strahlungsarten konnte festgestellt werden, daß sie alle ausnahmslos Wellen darstellen, die sich nur durch ihre Wellenlänge voneinander un-

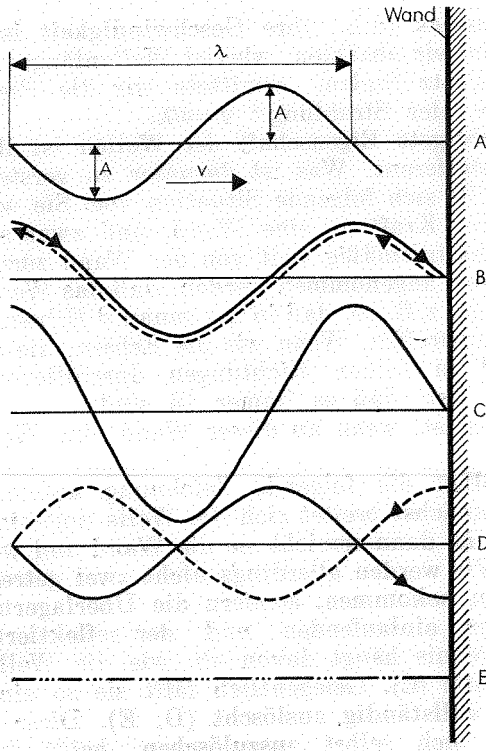

Abb. 1. Reflexion von Wellen an einer Wand

terscheiden. Die Wellenlänge ist also das entscheidende Kriterium, nach dem wir die verschiedenen Arten elektromagnetischer Strahlung quantitativ voneinander abgrenzen.

Die größte Wellenlänge besitzen die Radiowellen. Sie reicht von einigen Kilometern bis zu wenigen Zentimetern.

Die Wellenlänge der Wärmestrahlung ist kürzer und reicht von 1 cm bis 10^{-2} cm.

Noch kürzer sind die Wellen des sichtbaren Lichts; sie liegen etwa zwischen $4 \cdot 10^{-5}$ und $8 \cdot 10^{-5}$ cm.

Die kürzesten Wellen der genannten Strahlungsarten besitzt die Röntgenstrahlung mit einer Wellenlänge von 10^{-7} bis 10^{-9} cm.

Alle diese Wellen breiten sich im Vakuum mit der gleichen Geschwindigkeit aus, nämlich mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s.

Nach der Formel $\nu = v/\lambda$ läßt sich die Frequenz jeder Strahlungsart nun leicht berechnen. Die höchste Frequenz muß den Röntgenstrahlen und die niedrigste offenbar den Radiowellen zugeordnet werden.

Wichtig ist folgender Umstand: Man muß sich stets darüber im klaren sein, daß natürlich jede beliebige Strahlung keine Sinuskurve wie in der Zeichnung darstellt, sondern einen physikalischen Prozeß, dessen Grundcharakteristika (z.B. die Periodizität) mittels solch einfacher Modelle ausgedrückt werden können.

Jede Strahlungsart hat ihre Besonderheiten. Konzentrieren wir uns zunächst auf die Sonnenstrahlung. Da die Sonnenstrahlung den gleichen Gesetzen folgt wie jede andere Strahlungsart auch, wird uns dadurch das Verständnis der Gesetze der Wärmestrahlung erleichtert, die in der Geschichte der Quantenmechanik eine wesentliche Rolle gespielt haben.

Wer sich von der Sonne wärmen läßt, macht sich vermutlich keine Gedanken darüber, aus welchen Wellen die Sonnenstrahlen bestehen. Hin und wieder freilich fragt man sich doch, warum man in den Bergen einen Sonnenbrand bekommen oder warum man abends nicht mehr braun werden kann.

Newton lebte in England, wo es nicht allzuviel Sonnenschein gibt. Dennoch machte er sich darüber Gedanken, woraus das Sonnenlicht eigentlich besteht. Er stellte 1664 folgenden Versuch an: Er ließ einen Lichtstrahl durch ein Prisma fallen und entdeckte auf der dahinter befindlichen Wand die Farben des Regenbogens, das Spektrum des Sonnenlichtes also.

Jeder Farbe dieses Regenbogenspektrums entspricht eine Wellenlänge des Sonnenlichts: Die größte Wellenlänge hat rotes Licht mit $7 \cdot 10^{-5}$ cm; grünes Licht hat eine Wellenlänge von $5 \cdot 10^{-5}$ cm und violettes Licht von $4 \cdot 10^{-5}$ cm. Außer der sichtbaren Strahlung enthält das Sonnenspektrum natürlich auch noch andere Strahlungsarten, insbesondere die Infrarotstrahlung — ihre Wellenlänge ist noch größer als die des roten Lichts — und die Ultraviolettstrahlung, deren Wellenlänge kürzer als die Wellenlänge des violetten Lichts ist. So entspricht der Ultraviolettstrahlung die größte und der Infrarotstrahlung die kleinste Frequenz.

Die relative Helligkeit der verschiedenen Farben im

Emissionsspektrum ist unterschiedlich und hängt von der Temperatur des strahlenden Körpers ab: In der Sonnenstrahlung beispielsweise überwiegt gelbes Licht bei weitem. So zeigt das Spektrum einer jeden Strahlung, welche Strahlen darin enthalten sind und welchen mengenmäßigen Anteil sie haben.

Beim Durchtritt durch die Erdatmosphäre ändert die Sonnenstrahlung ihre spektrale Zusammensetzung, weil die verschiedenen Strahlungsanteile des Sonnenspektrums in der Erdatmosphäre verschieden absorbiert werden. Die ultravioletten Strahlen werden am stärksten absorbiert. Da die Dicke der überlagernden Luftschicht im Gebirge geringer ist, nimmt der Ultraviolettanteil im Spektrum hier zu, und deshalb bräunt die Haut in höheren Lagen schneller als im Tal.

Obgleich diese Tatsache an und für sich bekannt ist, wollen wir nochmals auf eine für unsere weiteren Ausführungen wichtige Einzelheit verweisen: Die Ursache eines Sonnenbrandes sind die ultravioletten und nicht die roten Strahlen. Doch um einen Sonnenbrand hervorzurufen, muß unbedingt eine bestimmte Energiemenge aufgewendet werden. Das bedeutet, daß die Wellen mit der größten Frequenz (also die Ultraviolettstrahlung) am energiereichsten sind und die Wellen der Infrarotstrahlung weniger Energie besitzen, obwohl gerade sie als Wärmestrahlen bezeichnet werden. Dies ist ein sehr wichtiges Ergebnis.

Fassen wir zusammen: Jeder Körper besteht aus Atomen, die wir uns vorläufig als Kügelchen von 10^{-8} cm Durchmesser sowie unterschiedlicher Masse (je nach Art des Atoms) — nämlich zwischen 10^{-24} und 10^{-22} g — vorstellen wollen. Sie bewegen sich sehr rasch, führen Schwingungen aus und stoßen dabei auch zusammen, wobei ihre Bewegungsgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur des Körpers ansteigt. Diese Wärmebewegung der Atome führt zu einer gänzlich neuen Erscheinung, der Wärmestrahlung.

Um deren Eigenschaften kennenzulernen, wollen wir uns wieder der Eisenstange zuwenden, die immer noch im Ofen liegt. Je heißer der Ofen ist, um so mehr Wärme strahlt die Eisenstange aus. Natürlich war diese Tatsache schon immer bekannt, aber erst Josef Stefan (1835—1893) leitete 1879 empirisch die quantitative Beziehung dafür her, und

Ludwig Boltzmann (1844—1906) fand 1884 hierzu auch die theoretische Ableitung. Es zeigte sich, daß die insgesamt abgestrahlte Wärmemenge mit steigender Temperatur rasch zunimmt, und zwar mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur des Körpers.

Was wäre denn nun, wenn man anstelle der Eisenstange einen großen Feldstein in den Ofen legte? Würde sich seine Strahlungsenergie von der Strahlung einer Eisenstange unterscheiden? Im Jahre 1859 bewies Gustav Robert Kirchhoff (1824—1887), daß dies nicht der Fall sein wird, wenn die Temperatur des Ofens in beiden Fällen gleich ist. Er bewies sogar noch etwas mehr als das; doch um dieses »Etwas« zu verstehen, müssen wir unseren Bericht unterbrechen und uns dem Strahlungsstrom, der von dem erwärmten Körper ausgeht, ein wenig aufmerksamer zuwenden.

Ebenso wie das Sonnenlicht ist auch dieser Wärmestrom inhomogen. Jede Wärmestrahlung besteht erstens aus Strahlen verschiedener Wellenlänge, und zweitens ist ihr Anteil am Gesamtstrahlungsstrom verschieden. Wenn wir beide Parameter kennen, können wir sagen, daß uns die spektrale Zusammensetzung der Strahlung bekannt ist.

Um die Tatsache zu unterstreichen, daß der Anteil einer Strahlung mit der Frequenz ν am Gesamtstrahlungsstrom von der Temperatur T abhängig ist, verwendet man gewöhnlich folgende Formel: $U=U(\nu, T)$, wobei U die Energie ist, die durch die Wärmestrahlen mit der Frequenz ν von einem Körper mit der Temperatur T ausgesandt wird. Natürlich wird sich die spektrale Zusammensetzung der Wärmestrahlung eines Körpers ändern, wenn wir ihm eine andere Temperatur geben. Die quantitative Beziehung für diese Änderung formulierte Wilhelm Wien (1864—1928) im Jahre 1893.

Doch selbst bei gleicher Temperatur ist die Strahlung verschiedener Körper unterschiedlich. Man kann sich leicht davon überzeugen, wenn man im Dunkeln beispielsweise eine Kugel aus Stahl und eine Kugel aus Stein gleichzeitig erhitzt. Sehr bald fand man jedoch heraus, daß sich die Situation ändert, wenn man anstelle massiver Kugeln Hohlkugeln erhitzt und ihre Strahlung durch eine kleine Öffnung in der Kugelwand beobachtet: Die spektrale Zusammensetzung dieser Strahlung hängt nun nicht mehr von dem Stoff ab, aus dem die Kugel besteht. Dieses Spektrum wurde als Spektrum eines schwarzen Körpers bezeichnet.

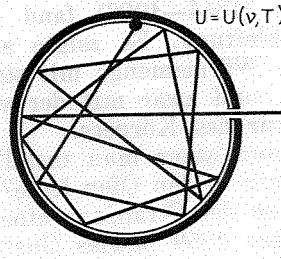

Abb. 2. Hohlraumstrahlung

Der Ursprung dieser etwas merkwürdigen Bezeichnung ist leicht zu verstehen. Stellen Sie sich vor, daß die Kugel nicht erwärmt, sondern von außen beleuchtet wird. Die Öffnung in der Kugel wird dabei unabhängig vom Kugelwerkstoff schwarz erscheinen. Das hat seinen Grund darin, daß alle in das Innere des Hohlraumes gelangenden Strahlen dort mehrfach reflektiert wieden und nur zu einem äußerst geringen Anteil wieder nach außen treten.

Ein reales Beispiel für einen schwarzen Körper ist ein gewöhnlicher Ofen, oder besser noch, ein Martinofen. Wenn Sie Gelegenheit hatten, einmal in das Innere eines Martinofens zu blicken, dann ist Ihnen wahrscheinlich eine interessante Erscheinung aufgefallen: Aus der Öffnung des Martinofens strömt gleichmäßiges Licht, das keine Betrachtung der Einzelheiten aller im Ofeninnern befindlichen Gegenstände erlaubt. Unsere bisher über die Strahlung erworbenen Kenntnisse machen uns diese Tatsache verständlich.

Zwei gleichgroße Kugeln aus Stein und Stahl lassen sich in der Sonne leicht voneinander unterscheiden, denn allzu unterschiedlich ist ihr Glanz: Die Stahlkugel reflektiert mehr Licht als die Steinkugel. Erhitzt man jedoch beide Kugeln im Dunkeln, stellt man fest, daß die Steinkugel stärker strahlt als die Stahlkugel. (Übrigens ist dies auch einer der Gründe dafür, daß man in einer Sauna Feldsteine und nicht Stahlblöcke erhitzt.)

Werfen wir nun beide Kugeln in einen Ofen, wo sie nicht nur erwärmt werden und selbst strahlen, sondern gleichzeitig auch die Strahlung anderer Körper absorbieren und reflektieren, dann werden wir zwei völlig gleiche Kugeln zu sehen bekommen. Warum? Die Steinkugel emittiert

zwar einen größeren Anteil »eigener« Strahlung als die Stahlkugel, sie absorbiert aber auch einen größeren Anteil »fremder« Strahlung. Deshalb ist der Gesamtwärmestrom (bestehend aus »eigener« und »fremder« Strahlung) bei beiden Kugeln gleich; deshalb auch lassen sich beide Kugeln weder voneinander noch von den Wandungen des Ofens unterscheiden.

Aus dieser Tatsache leitete Kirchhoff 1859 folgendes Gesetz ab: Das Verhältnis zwischen der Strahlungsemission und der Strahlungsabsorption bildet die unabhängig von der Natur der Körper gültige universelle Funktion $U = U(\nu, T)$. Das Strahlungsgesetz $U = U(\nu, T)$ enthält nahezu alle Informationen über die Eigenschaften der Wärmestrahlung. Insbesondere ergeben sich aus der Farbe des erhitzten Körpers die überwiegend emittierten Wellenlängen.

Die Bedeutung der Funktion $U = U(\nu, T)$ wurde bereits zu Kirchhoffs Zeiten erkannt, doch vierzig Jahre lang mühte man sich vergebens, für sie eine Formel zu finden, die die experimentell aufgenommene Kurve richtig beschrieb.

Ehe wir im folgenden auf die bahnbrechenden Ergebnisse der Untersuchungen Max Plancks (1858—1947) eingehen, wollen wir nochmals eine Besonderheit der Wärmestrahlung erwähnen, von der bereits die Rede war: Wir meinen die Farbänderung von Körpern bei Erwärmung.

Solange die Temperatur eines Körpers nicht hoch ist, strahlt dieser Körper zwar, leuchtet aber nicht, d.h., er emittiert vorläufig nur Wärme- und Infrarotstrahlung, die das Auge nicht sieht. Bei weiterer Temperaturzunahme beginnt der Körper zu leuchten: Anfangs ist seine Farbe rot, dann geht sie nach orange über, wird gelb usw. Bei 6000 °C z.B. stellt gelbes Licht den überwiegenden Strahlungsanteil. Übrigens hat man anhand dieses Merkmals die Temperatur der Sonnenoberfläche ermittelt.

Beachten Sie folgendes: Als es um den Sonnenbrand ging, kamen wir zu dem Schluß, daß eine Strahlung um so mehr Energie liefert, je höher ihre Frequenz ist. Und nun stellen wir fest, daß die Frequenz der emittierten Wellen um so höher war, je mehr Energie zur Erwärmung des Körpers verwendet wurde. Also existiert irgendeine Beziehung zwischen der Frequenz und der Energie der Strahlung.

Ende des vorigen Jahrhunderts suchte Planck nach einer universellen Formel für das Spektrum eines schwarzen Körpers. Welche Überlegungen hatte er anstellen müssen?

Durch die Bewegung der Atome wird Wärmestrahlung erzeugt, doch beeinflußt die Wärmestrahlung auch die Atome selbst, da sie Energie mitführt. Im Ergebnis dieser Wechselwirkung stellt sich im schwarzen Körper ein thermisches Gleichgewicht ein: Ebensoviel Wärme, wie die Atome von außen erhalten, wird in Form von Strahlungsenergie abgeführt. Aus der kinetischen Theorie der Materie wußte Planck, daß die mittlere Schwingungsenergie der Atome E_{Schw} der absoluten Temperatur T proportional ist:

$$E_{Schw} = kT.$$

Darin ist $k = 1{,}38 \cdot 10^{-16}$ erg/Grad, ein Propotionalitätsfaktor, der als Boltzmannkonstante bezeichnet wird.

Planck wußte: Die Strahlungsenergie wächst mit der Frequenz. Die Frage war nur, wie diese beiden Größen zusammenhängen. Planck ging von der einfachsten Annahme aus: Die Strahlungsenergie E_{Str} ist der Strahlungsfrequenz proportional:

$$E_{Str} = h \cdot \nu.$$

Hierin ist h ein anderer Proportionalitätsfaktor. (Dieser Gedanke ist so einfach, daß er nicht durch noch einfachere Begriffe bewiesen oder erklärt werden kann. Geniale Einfälle zeichnen sich oft gerade durch solche Einfachheit aus.)

Von dieser Annahme ausgehend, fand Planck die Formel für die Spektralfunktion: $U = U(\nu, T)$. Man könnte fast sagen, er erriet sie. Allerdings darf man aus diesen Worten nicht die Folgerung ziehen, es wäre eine leichte Sache gewesen. Planck quälte sich zwei Jahre an dieser Formel herum.

Am 19. Oktober 1900 fand eine Ordentliche Tagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft statt, in deren Verlauf die Experimentatoren Heinrich Rubens (1865 bis 1922) und Ferdinand Kurlbaum (1857—1927) über neue, genauere Messungen des Spektrums eines schwarzen Körpers

berichteten. In der anschließenden Diskussion klagten die Experimentatoren darüber, daß keine einzige Theorie ihre Ergebnisse erklären könne. Planck schlug ihnen vor, seine Formel zu benutzen. Noch in der gleichen Nacht verglich Rubens seine Messungen mit der Planckschen Formel und überzeugte sich, daß sie das Spektrum des schwarzen Körpers bis in alle Einzelheiten richtig beschreibt. Am Morgen teilte er dies seinem Kollegen Planck mit und beglückwünschte ihn zum Erfolg.

Planck war Theoretiker und schätzte daher nicht nur die Ergebnisse einer Theorie, sondern auch ihre innere Vollkommenheit. Aber er wußte zu diesem Zeitpunkt noch nicht, daß er ein neues Naturgesetz entdeckt hatte. Er meinte, daß seine Formel aus bereits früher bekannten Gesetzen hergeleitet werden könne. Darum bemühte er sich, das Strahlungsgesetz mit Hilfe der kinetischen Theorie der Materie und der Thermodynamik theoretisch zu begründen. Nun folgten zwei Monate rastloser Arbeit unter äußerster Anstrengung aller Kräfte. Das Vorhaben gelang. Aber im Verlaufe seiner Berechnungen sah sich Planck zu der Annahme gezwungen, daß die Strahlung in Portionen (oder Quanten) ausgesandt wird, deren Größe sich genau aus der Formel $E_{Str}=h\cdot\nu$ ergibt, die er selbst gerade erst gefunden hatte. Nur unter dieser Voraussetzung gelang die Ableitung der richtigen Formel für das Strahlungsspektrum.

Die Beziehung $E_{Str}=h\cdot\nu$ läßt sich ebensowenig logisch beweisen wie das Gravitationsgesetz. Beide existieren, weil die Welt so »eingerichtet« ist. Nur wenn man sie akzeptiert, lassen sich mit ihrer Hilfe auch andere Naturerscheinungen erklären. Auch für das Spektrum des schwarzen Körpers galt das.

Formal betrachtet war Plancks Annahme höchst klar und einfach, doch widersprach sie im Grunde genommen allen bisherigen Ansichten der Physik und der in langen Jahren anerzogenen Denkweise. Oft haben wir die Tatsache betont, daß die Strahlung ein Wellenprozeß ist. Wenn sich das aber so verhält, dann muß die Energieübertragung im Verlauf dieses Prozesses kontinuierlich und nicht in Portionen oder Quanten erfolgen. Diesen nicht zu beseitigenden Widerspruch empfand Planck so deutlich wie kein anderer zuvor. Als er seine berühmte Formel ableitete, war er 42 Jahre alt. Sein ganzes weiteres Leben

litt er unter der logischen Unvollkommenheit seiner eigenen Theorie. Bei den späteren Generationen von Physikern war diese Empfindung nicht mehr so deutlich ausgeprägt: Sie kannten ja bereits das fertige Ergebnis und hatten gelernt, anders zu denken. Planck dagegen war in den Traditionen der klassischen Physik erzogen worden und ging völlig in ihrer strengen und geruhsamen Welt auf. Ausgerechnet ihm mußte es passieren, daß er die logische Strenge der gesamten klassischen Physik zerstörte, indem er das langjährige Rätsel der Strahlungstheorie löste. War die Lösung dieses im Grunde genommen doch sehr speziellen Problems nicht mit einem zu hohen Preis bezahlt worden? Für Planck brachte diese Erkenntnis eine große Erschütterung. Später erinnerte er sich in seinem Vortrag aus Anlaß der Verleihung des Nobelpreises daran, daß die Anerkennung der Realität der Quanten für ihn gleichbedeutend war »... mit der Zerstörung der Kontinuität aller kausalen Zusammenhänge«.

Erst erheblich später, im Jahre 1927, vermochte eine neue Wissenschaft — die Quantenmechanik — zu erklären, daß hier kein Widerspruch vorliegt. Doch bis dahin war es noch ein langer Weg.

Am 14. Dezember 1900 erblickte im Sitzungssaal der Deutschen Physikalischen Gesellschaft eine neue Wissenschaft das »Licht der Welt«, die Lehre von den Quanten. Vor einem kleinen Zuhörerkreis verlas der Ordentliche Professor für Physik Max Planck seinen Vortrag »Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum«. Rein äußerlich betrachtet war nichts Aufregendes geschehen. Planck hatte gesprochen wie immer, sachlich-nüchtern, fast trocken und ausführlich.

An jenem Tag begriffen nur wenige die Größe dieses Augenblicks. Erst später erfaßte man die Bedeutung der Planckschen Konstante h für die gesamte atomare Welt. Diese Konstante war, wie sich herausstellte, sehr klein:

$$h = 6{,}62 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{erg} \cdot \mathrm{s}.$$

Aber sie stieß die Tür zur Welt der atomaren Erscheinungen auf. Und stets, wenn wir aus der uns gewohnten Welt der klassischen Physik in die Welt des Ungewöhnlichen und der Quanten gelangen wollen, müssen wir durch diese schmale Pforte treten.

Der Apfel des Demokrit

Wir wissen vorläufig sehr wenig von den Atomen, doch genügt bereits dieses Wissen, um Demokrits Problem zu lösen: Wie oft muß man einen Apfel teilen, um zu seinem »Atom« zu gelangen?

Nehmen wir an, Demokrit hätte einen großen Apfel von 10 cm Durchmesser in der Hand gehalten. Dann beträgt sein Volumen etwa $V=10^3$ cm^3. Bei jeder Teilung wird es auf die Hälfte reduziert, so daß nach der n-ten Teilung sein Volumen V_n den Wert

$$V_n = \frac{V}{2^n} \approx \frac{10^3}{10^{0,3n}} = 10^{\,3-0,3n}$$

besitzt.

Nach Loschmidt ist das Volumen eines Atoms ungefähr $(10^{-8}\text{ cm})^3 = 10^{-24}$ cm^3. Die Teilung ist beendet, sobald das Volumen V_n gleich dem Volumen eines Atoms wird, d.h. bei der Erfüllung der Bedingung:

$$10^{3-0,3\,n} = 10^{-24}.$$

Hieraus läßt sich nun leicht berechnen, daß $0{,}3\ n=27$, d.h. $n=90$, sein muß. Bereits nach 90 Teilungen hätte Demokrit somit sein Ziel erreicht. Selbst wenn man berücksichtigt, daß er während seiner Tätigkeit überlegte und den Apfel deshalb ohne alle Eile teilte, hätte er das in einer halben Stunde schaffen können.

Newton über die Atome

»Ich halte es für wahrscheinlich, daß Gott am Anfang die Materie in Form kompakter, massiver, fester, undurchdringlicher und sich bewegender Teilchen solcher Größen und Formen und mit solchen weiteren Eigenschaften und in derartigen Proportionen zum Raum schuf, daß sie jenem Ziel, für das er sie geschaffen hat, am besten dienen konnten und daß diese einfachsten Partikeln in ihrer Festigkeit unvergleichlich stabiler sind als beliebig andere aus ihnen aufgebaute Körper; sogar so stabil, daß sie niemals verschleißen oder in Stücke zerbrechen; keinerlei ge-

wöhnliche Kräfte sind imstande, das zu zerteilen, was Gott selbst am ersten Schöpfungstage schuf...«

»Ich halte es für offensichtlich, daß diese Partikeln nicht nur die Eigenschaft der Trägheit gemeinsam mit jenen passiven Bewegungsgesetzen besitzen, die natürlicherweise aus diesen Kräften fließen, sondern daß sie sich nach bestimmten Wirkungsprinzipien bewegen, ähnlich der Gravitation, die die Ursache für die Anregung und Verbindung der Körper bilden. Diese Prinzipien betrachte ich nicht als geheimnisvolle Eigenschaften, eigens postuliert, um bestimmte Ergebnisse — ausgehend von den spezifischen Formen der Dinge — herleiten zu können, sondern ich meine, daß es allgemeingültige Naturgesetze sind, auf welche die Existenz dieser Dinge selbst zurückgeht; ihre Richtigkeit wird für uns offenkundig durch die Erscheinungen, obwohl ihre Ursachen noch nicht entdeckt sind. Offenkundig sind nur die Eigenschaften, ihre Ursachen aber sind unbekannt.«

Planck über das Quant

In der Schwedischen Akademie der Wissenschaften in Stockholm hielt Planck aus Anlaß der Verleihung des Nobelpreises am 2. Juni 1920 den Vortrag »Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quantentheorie«. Wir wollen hier einige Auszüge anführen.

»Das Scheitern aller Versuche, die entstandene Kluft zu überbrücken, ließ bald keinen Zweifel mehr übrig: entweder war das Wirkungsquantum nur eine fiktive Größe; dann war die ganze Deduktion des Strahlungsgesetzes prinzipiell illusorisch und stellte weiter nichts vor als eine inhaltsleere Formelspielerei, oder aber der Ableitung des Strahlungsgesetzes lag ein wirklich physikalischer Gedanke zugrunde; dann mußte das Wirkungsquantum in der Physik eine fundamentale Rolle spielen, dann kündigte sich mit ihm etwas ganz Neues, bis dahin Unerhörtes an, das berufen schien, unser physikalisches Denken, welches seit der Begründung der Infinitesimalrechnung durch Leibniz und Newton sich auf die Annahme der Stetigkeit aller ursächlichen Zusammenhänge aufbaut, von Grund aus umzugestalten.«

»Sei dem aber wie immer: in jedem Falle kann darüber kein Zweifel bestehen, daß die Wissenschaft einmal auch

dieses schwere Dilemma bemeistern wird, und daß dasjenige, was uns heute unbefriedigend erscheint, dereinst von einer höheren Warte aus gerade als das durch besondere Harmonie und Einfachheit Ausgezeichnete angesehen werden wird. Bis zur Erreichung dieses Zieles aber wird das Problem des Wirkungsquantums nicht aufhören, die Forschung immer von neuem anzuregen und zu befruchten, und je größere Schwierigkeiten sich seiner Lösung entgegenstellen, um so bedeutsamer wird sie sich schließlich erweisen für die Ausbreitung und Vertiefung unserer gesamten physikalischen Erkenntnis.«

Planck wußte sehr wohl um die Bedeutung seiner Entdeckung. Zu seinem Sohn hatte er gesagt: »Ich habe heute eine ebenso wichtige Entdeckung gemacht wie Newton.« Doch er äußerte sich niemals in der Öffentlichkeit darüber. Wahrscheinlich ist daraus die irrige Auffassung entstanden, daß Planck »offenbar nicht wußte, was er tat, als er seine Formel herleitete«. Die angeführten Auszüge aus seinem Vortrag widerlegen diesen Irrtum ein weiteres Mal.

Die Fakten sprechen für das Atom

Die Geschichte der Physik ist nicht eine Anhäufung von Tatsachen, eine willkürliche Sammlung von Formeln und Begriffen, sondern sie übermittelt uns ein zusammenhängendes Bild der Entstehung und Entwicklung physikalischer Ideen.

Für den Physiker ist die Geschichte seiner Wissenschaft ein notwendiges Bildungselement.

Der berühmte Mathematiker Felix Klein (1849—1925) sagte einmal, der schnellste und sicherste Weg, eine Wissenschaft beherrschen zu lernen, bestünde darin, ihren Entwicklungsweg selbst nachzuvollziehen. Dies ist gewiß nicht der einfachste Weg, aber er ist am interessantesten, und deshalb haben wir ihn gewählt. Mit besonderer Aufmerksamkeit wollen wir die Entwicklung der Begriffe Strahlen, Atome und Elektronen verfolgen, um am Ende des Weges die Schönheit ihrer Synthese zu empfinden.

Die Linien verraten es

Die Untersuchung des Sonnenstrahls führt uns an die Schwelle der Quantenphysik. Wahrscheinlich erscheint Ihnen dieser Satz vorläufig wenig überzeugend. Doch der Eindruck von Willkür, den man bei einer ersten Bekanntschaft mit Plancks Theorie empfindet, ist in Wirklichkeit trügerisch. Plancks Formel ist nicht das Ergebnis einer gedanklichen Konstruktion; vielmehr entstand sie erst nach einer langen Analyse exakter Experimente. Natürlich genügte die Analyse allein nicht zur Ermittlung der Formel. Notwendig waren auch eine große Gedankenarbeit, ein Höhenflug der Phantasie, aber auch die Kühnheit, unerwartete Folgerungen aus der Theorie nicht zu fürchten.

Die Physiker Lord Rayleigh (1842—1919), Jeans (1877 bis 1946) und Wilhelm Wien (1864—1928) hatten bereits vor Planck verschiedene Formeln zur Beschreibung des Spektrums des schwarzen Körpers vorgelegt. Doch jedesmal hatten die beiden Experimentalphysiker Otto Lummer

(1860—1925) und Ernst Pringsheim (1859—1917) diese Formeln nach sorgfältigen Messungen des Spektrums als unvollkommen ablehnen müssen. Nur Plancks Formel stellte sie zufrieden: Sie stimmte mit ihren Versuchsergebnissen geradezu verblüffend überein, obwohl sie dadurch keineswegs verständlicher wurde.

Folgen wir dem Beispiel dieser beiden Physiker, und betrachten wir die Struktur des Sonnenstrahls noch aufmerksamer als bisher. Wir werden dabei feststellen, daß der Sonnenstrahl viele Informationen in sich birgt, wenn man sie nur zu lesen versteht.

Schickt man einen Sonnenstrahl durch ein Prisma, so entsteht auf einem dahinter aufgestellten Bildschirm ein Spektrum, eine wohlbekannte Erscheinung, an die man seit 200 Jahren gewöhnt ist. Auf den ersten Blick gibt es zwischen den einzelnen Bereichen des Spektrums keine scharf ausgeprägten Grenzen: Das Rot geht allmählich in Orange über, das Orange in Gelb usw.

Dies glaubte man jedenfalls so lange, bis der englische Arzt und Chemiker William Hyde Wollaston (1766—1828) dieses Spektrum sorgfältiger untersuchte. Zu diesem Zweck konstruierte er den ersten Spaltspektrographen. Er entdeckte einige scharf ausgeprägte dunkle Linien, die das Sonnenspektrum ohne erkennbares Ordnungsprinzip an verschiedenen Stellen durchzogen. Er maß ihnen keine besondere Bedeutung bei und nahm an, daß ihr Auftreten entweder von der Qualität des Prismas, der Lichtquelle oder von anderen Störfaktoren abhänge. Auch die Linien selbst hielt er nur deshalb für interessant, weil sie die Farbstreifen des Spektrums voneinander trennen. Später wurden diese dunklen Linien als Fraunhofersche Linien bezeichnet. zu Ehren ihres eigentlichen Erforschers.

Joseph Fraunhofer (1787—1826) hatte das Glasschleiferhandwerk erlernt. Seine naturwissenschaftlichen Interessen führten ihn zu immer neuen Versuchen mit optischen Gläsern, die er sich zurechtschliff. Er untersuchte sorgfältig die dunklen Linien im Sonnenspektrum. Insgesamt zählte er 574 solcher Linien; für die wichtigsten von ihnen gab er die genaue Lage im Spektrum und eine entsprechende Bezeichnung an. Diese Lage war unveränderlich, und insbesondere erschien im gelben Teil des Spektrums stets an der gleichen Stelle eine scharfe Doppellinie, die Fraunhofer als D-Linie bezeichnete.

Fraunhofer stellte noch eine weitere wichtige Tatsache fest: Im Spektrum der Flamme eines Spiritusbrenners erschien an der gleichen Stelle, wo im Sonnenspektrum die dunkle D-Linie lag, stets eine helleuchtende gelbe Doppellinie. Die Bedeutung dieser Tatsache konnte erst viele Jahre später gewürdigt werden.

Im Jahre 1819 siedelte Fraunhofer nach München über. Er wurde dort Professor, Mitglied der Akademie der Wissenschaften und Konservator des Physikalischen Kabinetts der Akademie. Bei weiteren Untersuchungen der dunklen Linien im Sonnenspektrum überzeugte er sich davon, daß sie keine optische Täuschung waren, sondern in der Natur des Sonnenlichts selbst begründet liegen. Von der merkwürdigen Beschaffenheit dieser Linien zu weiteren Beobachtungen angeregt, entdeckte er sie später auch im Spektrum der Venus und des Sirius.

Von den Entdeckungen Fraunhofers sind für uns seine Beobachtungen der doppelten D-Linie besonders wichtig. Als er seine Untersuchungen im Jahre 1814 veröffentlichte, fanden sie keine besondere Beachtung. Doch seine Arbeit war nicht vergebens: Nach 43 Jahren beobachtete William Swan, daß die doppelte, gelbe D-Linie im Spektrum der Spiritusflamme bei Vorhandensein des Metalls Natrium entsteht. (Natriumspuren findet man fast stets in den unterschiedlichsten Stoffen, so im Kochsalz oder auch im Spiritus.) Wie viele andere Wissenschaftler vor ihm erkannte Swan die Bedeutung seiner Entdeckung nicht. Er stellte nicht einmal fest, daß diese Linie zum Natrium gehört.

Auf diesen einfachen und wichtigen Gedanken kamen erst zwei Jahre später, im Jahre 1859, die beiden Professoren Gustav Robert Kirchhoff (1824—1887) und Robert Wilhelm Bunsen (1811—1899). In Heidelberg stellten sie im Universitätslabor einen einfachen Versuch an. Hatte man bisher entweder nur Sonnenlicht oder nur das Licht einer Spiritusflamme durch ein Prisma geschickt, so ließen Kirchhoff und Bunsen erstmals beide Strahlungen gleichzeitig durch das Prisma fallen. Sie beobachteten dabei eine Erscheinung, von der hier ausführlicher berichtet werden soll.

Fiel nur das Sonnenlicht auf das Prisma, dann sahen sie an der Skale des Spektroskops das Sonnenspektrum mit der dunklen D-Linie am gewohnten Ort. Diese dunkle

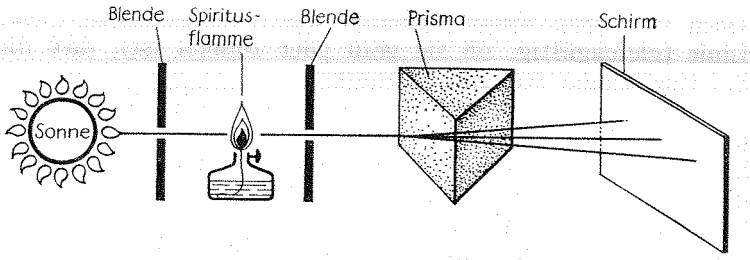

Abb. 3. Versuch von Bunsen und Kirchhoff

Linie blieb auch dann an ihrer Stelle, wenn die Forscher eine Spiritusflamme in den Strahlengang brachten. Doch sobald sie das Sonnenlicht abschirmten und das Prisma nur mit dem Licht der Spiritusflamme beleuchteten, trat an der Stelle der dunklen D-Linie die helle gelbe D-Linie des Natriums deutlich hervor. Entfernten Kirchhoff und Bunsen die Abschirmung wieder, wurde auch die D-Linie erneut dunkel.

Später ersetzten sie das Sonnenlicht durch das Licht eines glühenden Körpers, doch das Ergebnis blieb stets gleich: An die Stelle der leuchtend gelben D-Linie trat die dunkle Linie, d.h., die Spiritusflamme absorbierte stets jene Strahlen, die sie selbst emittierte.

Um zu begreifen, warum dieses Ereignis die beiden Professoren so erregte, müssen wir uns ihre Überlegungen verdeutlichen.

Die leuchtend gelbe D-Linie im Spektrum der Spiritusflamme entsteht bei Vorhandensein von Natrium.

Im Sonnenspektrum befindet sich an der gleichen Stelle eine dunkle Linie unbekannter Natur.

Das Spektrum eines beliebigen glühenden Körpers ist kontinuierlich und enthält keine dunklen Linien. Läßt man dieses Licht jedoch durch eine Spiritusflamme treten, dann unterscheidet sich sein Spektrum überhaupt nicht mehr vom Sonnenspektrum, vielmehr enthält es jetzt sogar am gleichen Ort die gleiche dunkle Linie. Doch die Natur dieser dunklen Linie kennen wir nun bereits. Auf jeden Fall können wir erraten, daß sie dem Natrium gehört.

Folglich kann — abhängig von den Versuchsbedingungen — die D-Linie des Natriums entweder leuchtend gelb oder dunkel vor einem gelben Hintergrund erscheinen.

Doch in beiden Fällen bedeutet das Vorhandensein dieser Linie (gleichgültig, ob sie gelb oder dunkel ist), daß die Spiritusflamme Natrium enthält.

Da jedoch diese Spektrallinie der Spiritusflamme bei hindurchgehendem Licht mit der dunklen D-Linie im Sonnenspektrum zusammenfällt, bedeutet dies, daß es auf der Sonne Natrium gibt. Außerdem läßt sich daraus schlußfolgern, daß sich dieses Natrium in der äußeren Gashülle der Sonne befindet, die von innen durch den erhitzten Sonnenkern beleuchtet wird.

Ein kurzer, nur zwei Seiten umfassender Bericht, von Kirchhoff 1859 verfaßt, enthielt vier Entdeckungen auf einmal:

— Jedes Element besitzt sein Linienspektrum, d.h. eine ganz bestimmte Anordnung von Linien.

— Diese Linien kann man zur Analyse der Zusammensetzung von irdischen Stoffen, aber auch zur Erforschung der Stoffe auf den Sternen benutzen.

— Die Sonne besteht aus einem heißen Kern und einer demgegenüber verhältnismäßig kalten Atmosphäre erhitzter Gase.

— Die Sonne enthält Natrium.

Die ersten drei Entdeckungen wurden bald bestätigt. Eine Expedition, die die Französische Akademie der Wissenschaften 1868 unter der Leitung des Astronomen Pierre Jules César Janssen (1824—1907) nach Indien entsandte, stellte fest, daß alle dunklen Linien im Sonnenspektrum hell aufleuchten, sobald die vollständige Verfinsterung der Sonne eingetreten ist, d.h. zu dem Zeitpunkt, wenn der glühende Kern durch den Mondschatten abgedeckt wird und nur die Sonnenkorona leuchtet.

Die zweite Hypothese bestätigten Kirchhoff und Bunsen bereits im folgenden Jahr, indem sie diese zur Entdeckung zweier neuer Elemente, Rubidium und Zäsium, einsetzten.

In der Folgezeit entwickelte sich aus dieser bescheidenen Beobachtung an der gelben doppelten D-Linie des Natriums die Spektralanalyse, mit deren Hilfe wir heute die chemische Zusammensetzung ferner Galaxien ermitteln, die Temperatur und Rotationsgeschwindigkeit der Sterne sowie vieles andere messen können.

Dies alles ist in der Tat interessant. Doch für unsere Zwecke ist es wichtig, die Hauptsache zu verstehen: Was

brachten Kirchhoffs und Bunsens Entdeckungen für die Wissenschaft vom Atom, und welche Beziehungen haben sie zu unserem bisherigen Wissen um diese Dinge?

Wir kennen jetzt zwei Arten von Spektren: das kontinuierliche Spektrum (auch Wärmespektrum genannt) und das Linienspektrum. Das kontinuierliche Spektrum enthält alle Wellenlängen; es wird bei der Erwärmung von festen und flüssigen Körpern emittiert und hängt nicht von der Art dieser Körper ab.

Das Linienspektrum dagegen besteht aus einer bestimmten Anordnung einzelner, scharf ausgeprägter Linien und entsteht bei der Erwärmung von Gasen und Dämpfen, d.h., wenn die Wechselwirkung zwischen den Atomen schwach ist. Besonders wichtig erscheint nun der Umstand, daß diese Reihenfolge von Linien unwiederholbar und für jedes Element einmalig ist. Mehr noch: Das Linienspektrum der Elemente hängt nicht von der chemischen Verbindung ab, die aus diesen Elementen aufgebaut ist. Also müssen wir die Ursache in den Eigenschaften der Atome suchen.

Die Tatsache, daß die Elemente durch die Art ihres Linienspektrums eindeutig und vollständig bestimmt werden, war bald allgemein anerkannt. Daß dieses Spektrum jedoch auch das einzelne Atom charakterisiert, wurde erst 1874 dank den Arbeiten des berühmten englischen Astrophysikers John Norman Lockyer (1836—1920) erkannt.[1] Das führte zu dem unvermeidlichen Schluß: Wenn das Linienspektrum im Innern eines einzelnen Atoms entsteht, dann muß das Atom eine Struktur besitzen, d.h. Bestandteile haben.

Die Elektronen

Als im Jahre 1865 die Arbeiten Loschmidts erschienen, wußte man von den Atomen nur wenig: Man stellte sie sich als feste Kügelchen von etwa 10^{-8} cm Durchmesser und einer Masse zwischen 10^{-24} und 10^{-22} g vor. Jedem solcher »Kügelchen« konnte man ein »Atomgewicht« (genauer: die relative Atommasse) zuschreiben, d.h. eine Zahl, die angibt, wievielmal schwerer als ein Wasserstoffatom das jeweils betrachtete Kügelchen ist. Das Atomgewicht des Sauerstoffs ist beispielsweise gleich 16, und das des Heliums

[1] Übrigens sind die gleichen Gedanken von Maxwell (1860) und Boltzmann (1866) ausgesprochen worden.

beträgt 4. Hieraus läßt sich schließen, daß in 1 g Wasserstoff, 4 g Helium oder 16 g Sauerstoff — oder, wie man üblicherweise in der Chemie sagt, in einem Grammatom eines beliebigen Stoffes — die gleiche Anzahl von Atomen enthalten ist, unabhängig davon, ob es sich einmal um Wasserstoff-, ein anderes Mal um Helium- oder um Sauerstoffatome handelt. Diese Zahl beträgt $N = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ und wird die Avogadrosche Zahl genannt (nach Amadeo Avogadro, 1776—1856). Sie ist durch die Beziehung $N = L \cdot 22413{,}6$ mit der Loschmidtschen Zahl verknüpft, d.h., die Avogadrosche Zahl gibt die Anzahl von Gasmolekülen in einem Volumen von 22,4136 l bei der Temperatur schmelzenden Eises und bei Normaldruck an.

Diese Vorstellung von den Atomen als festen Kügelchen genügt zur Erklärung einer Vielzahl von Erscheinungen der Chemie, der Wärmelehre und des Aufbaus der Materie. Allerdings entstand bereits 1870 der Gedanke, daß das Atom aus noch einfacheren Partikeln bestehen müsse, und die Physiker machten sich auf die Suche nach diesen Teilchen. Zunächst wandten sie sich den elektrischen Eigenschaften des Atoms zu.

Alle Stoffe sind im Regelfall elektrisch neutral. Unter gewissen Bedingungen zeigen sie allerdings elektrische Eigenschaften. Reibt man z.B. einen Glasstab mit einem Wollappen oder Bernstein mit Seide, so verlieren sie ihre elektrische Neutralität. Besonders augenfällig treten die elektrischen Eigenschaften bestimmter Stoffe bei der Elektrolyse zutage.

Taucht man zwei Elektroden in eine Salzlösung (etwa in eine Lösung von Kochsalz) und schließt man sie an die Pole einer elektrischen Batterie an, dann treten in der Schmelze gewisse Veränderungen ein: An der Katode (d.h. der Elektrode, die an den negativen Pol der Batterie angeschlossen ist) beginnt die Abscheidung von reinem metallischem Natrium, und an der Anode entwickelt sich das gasförmige Chlor. Dies bedeutet, daß die Natriumatome in der Lösung positiv und die Chloratome negativ geladen sein müssen, somit Ionen sind und sich daher unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes in jeweils entgegengesetzter Richtung bewegen.

Michael Faraday (1791—1867) stellte im Jahre 1834 die quantitativen Gesetze dieser Erscheinung fest: Schickt man jeweils die gleiche Elektrizitätsmenge von 96 521 Coulomb

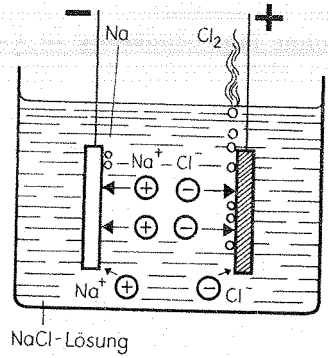

Abb. 4. Elektrolyse

durch Lösungen verschiedener Stoffe, deren Moleküle aus einwertigen Atomen aufgebaut sind, wird an den Elektroden stets genau ein Grammatom des Stoffes abgeschieden. Aus einer Kochsalzlösung entstehen demnach 23 g metallisches Natrium und 37,5 g Chlorgas.

Dieses Faradaysche Gesetz ist leicht zu verstehen, wenn man annimmt, daß jedes Atom in einer NaCl-Lösung mit einer bestimmten Ladung verknüpft ist, wobei diese Ladungen für die Ionen Na^+ und Cl^- gleich groß, aber entgegengesetzt geladen sind. (Die Bezeichnung Ion bedeutet soviel wie »Wanderer« und wurde von Faraday eingeführt.) Die Ladung, die ein Ion dabei transportiert, ist gleich $e = 1{,}6020 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.

Auch dieser Wert ist unvorstellbar klein. Aber an solche »Größen« haben wir uns ja schon gewöhnt. Erstaunlicher ist etwas anderes: Es gelang nicht, eine kleinere Ladung als diese Elementarladung e zu entdecken. Johnston Stoney (1826—1911) gab dieser kleinsten Ladungsmenge die Bezeichnung »Elektron«.

Anfangs verband man mit diesem Wort nicht die Vorstellung von einem Teilchen. Ursprünglich diente es nur zur Bezeichnung jener kleinsten Ladungsmenge, die ein Ion jedes beliebigen Atoms mit sich führen konnte. Aber der Gedanke, daß das Elektron ein Teilchen sei, existierte schon immer. Verfolgen wir einmal gedanklich den Elektrolyseprozeß. Wir haben ein Natriumion (Na^+), das sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes zur Katode bewegt. Dort besteht ein Überschuß an negativer Ladung. Deshalb

nimmt das Na^+-Ion bei Berührung der Katode eine negative Ladung auf, um ohne Masseänderung in Form eines neutralen Natriumatoms abgeschieden zu werden.

Versuchen Sie nun einmal, sich den Augenblick des Übergangs der negativen Ladung von der Katode zum Na^+-Ion vorzustellen. Was wird wohl dem Ion hinzugefügt, wenn es ohne Masseänderung neutral wird?

Man kann sich diesen Prozeß nur schwer vorstellen, wenn man nicht annimmt, daß die Elementarladung auch außerhalb des Atoms existieren kann. Diese Schwierigkeit sahen natürlich alle Physiker. Doch es war noch schwieriger, eine »atomare« (diskontinuierliche) Struktur der elektrischen Ladung anzuerkennen, weil dabei alle die bequemen und gewohnten Vorstellungen von der Elektrizität als einem gewissen dünnen Fluidum, das alle Körper ohne Schwierigkeiten durchdringt, zusammenbrachen. In seinem berühmten Traktat »Elektrizität und Magnetismus« (1873) nimmt Maxwell an, daß die Moleküle im Elektrolyt mit einer bestimmten Elektrizitätsmenge geladen sind. Er gesteht jedoch an der gleichen Stelle ein, daß »... diese verlockende Hypothese zu sehr großen Komplikationen führt«.

Am 5. April 1881 hielt Hermann von Helmholtz (1821 bis 1894) auf einer Versammlung im Königlichen Institut der Chemischen Gesellschaft zu Ehren Faradays einen Vortrag über die damalige Entwicklung der Auffassungen Faradays zur Elektrizität. In diesem Vortrag formulierte Helmholtz erstmals den Gedanken von der »molekularen Struktur der Elektrizität«. Er sagte: »Wenn wir die Hypothese akzeptieren, daß einfache Stoffe aus Atomen bestehen, so können wir den Schluß nicht vermeiden, daß auch die Elektrizität, und zwar die positive ebenso wie die negative, in gewisse elementare Portionen gegliedert ist, die sich wie Elektrizitätsatome verhalten.«

Selbstverständlich war diese Idee selbst zu jener Zeit keineswegs mehr neu. Bereits 1749 hatte Franklin etwas Ähnliches vermutet, doch war dieser Gedanke damals im Grunde genommen unbegründet und führte daher auch zu keinerlei neuen Schlußfolgerungen. Im Jahre 1871 nahm der deutsche Physiker Eduard Weber (1804—1891) diesen Gedanken Franklins wieder auf, fand jedoch keine Zustimmung. Zu seiner Zeit wußte man von der Elektrizität bereits so viel, daß man keiner Hypothese mehr ohne weiteres Glauben schenkte. Es wurden experimentelle Beweise für

die Existenz des Elektrons gebraucht. Man versuchte sie dadurch zu bringen, als man die Leitfähigkeit von Gasen zu studieren begann.

Stellen Sie sich ein Glasrohr vor, das mit einem beliebigen Gas (z.B. Neon) gefüllt und an beiden Enden zugeschraubt ist. Außerdem sollen an beiden Enden des Rohrs dünne Drähte (gewöhnlich aus Platin) eingeschmolzen sein. Schließen wir diese beiden Drähte an die Pole einer Batterie an, dann bildet der an den negativen Pol angeschlossene Draht die Katode und der andere Draht dementsprechend die Anode. Im so entstandenen Leiterkreis setzt Stromfluß ein, genauso wie bei der Elektrolyse. Wahrscheinlich war diese Analogie mit den bei der Elektrolyse zu beobachtenden Erscheinungen seinerzeit die Ursache dafür, daß Faraday im Jahre 1838 den Prototyp eines derartigen Rohrs (das »elektrische Ei« Faradays) konstruierte. Wir werden später sehen, daß diese Analogie mit der Elektrolyse rein äußerlich war, doch auch für sich allein genommen war die Leitfähigkeit der Gase so interessant, daß viele Forscher ihr ganzes Leben der Untersuchung dieser Eigenschaften widmeten.

Etwa um die Mitte des vorigen Jahrhunderts beschäftigte sich Julius Plücker (1801—1868) mit physikalischen Experimenten. Wenn Sie sich heute am Farbenspiel der Leuchtreklame erfreuen können, dann ist dies Plücker zu verdanken, der Professor für Mathematik in Berlin und Bonn war. Er erfand 1858 diese Leuchtstoffröhren. Man bezeichnet sie gewöhnlich als Geißlersche Röhren, nach dem berühmten Glasbläser Heinrich Geißler (1814—1879), der technischer Assistent bei Plücker war und bei der Herstellung dieser Röhren eine hohe Kunstfertigkeit entwickelte; etwa ein halbes Jahrhundert später nannte man sie dann auch Crookessche Röhren.

Als erstes stellte Plücker fest, daß die Leitfähigkeit eines Gases von seiner Konzentration in der Röhre abhängt. Sie nimmt zu, wenn man einen Teil des Gases aus der Röhre herauspumpt. Hierbei beginnt jedes Gas mit einer eigenen, charakteristischen Farbe zu leuchten, so daß man aus der Leuchtfarbe die Gaszusammensetzung in der Röhre bestimmen kann. (Zu diesem Schluß war Plücker sogar früher als Kirchhoff und Bunsen gekommen, ohne jedoch dessen Bedeutung zu erfassen.) Erhöht man die Gasverdünnung in der Röhre, dann entsteht in der Nähe der Katode ein licht-

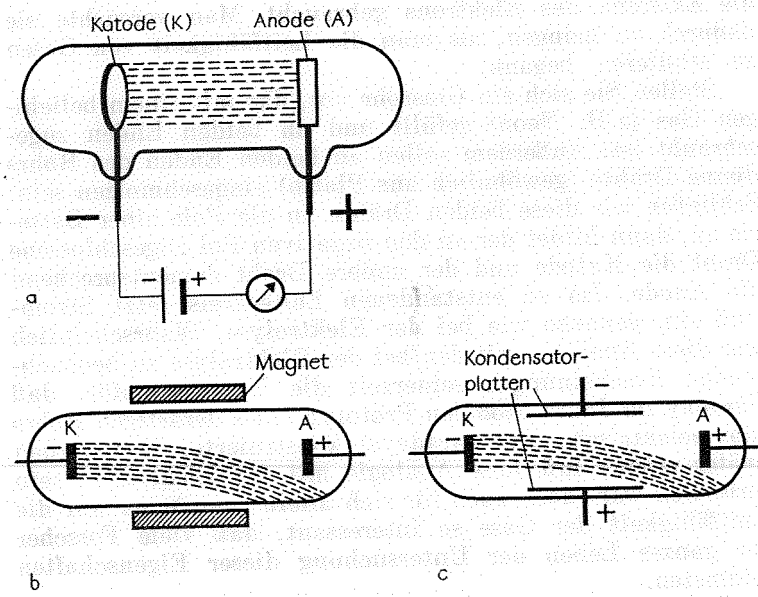

Abb. 5. Versuch von Plücker (a), Ablenkung der Katodenstrahlen im magnetischen (b) und elektrischen (c) Feld

loser Raum, der Dunkelraum (»Katodenfleck«), der sich bei weiterer Druckabnahme im Rohr ausdehnt und schließlich den ganzen Raum ausfüllt. Die Röhre hört zu leuchten auf. Doch dieser Dunkelraum lebt, er wird von irgendwelchen »Strahlen« erfüllt, auch wenn das Auge sie nicht sieht (ähnlich einer fliegenden Kugel, die wir auch nicht sehen, solange sie auf kein Hindernis trifft).

Plückers Schüler Eugen Goldstein (1850—1930) gab diesen Strahlen 1876 die Bezeichnung Katodenstrahlen. Noch früher, bereits im Jahre 1869, entdeckte ein anderer Schüler Plückers, Johann Hittorf (1824—1914), die Ablenkung dieser Strahlen im Magnetfeld, und 1879 schließlich zeigte Cromwell Fleetwood Varley (1828—1883), daß sie negativ geladen sind.

Anfangs versuchte man diese Erscheinungen ausgehend von der Wellenvorstellung zu begreifen (obwohl Varley schon 1871 die korpuskulare Auffassung vorzog). Das erklärt sich daraus, daß der berühmte Streit zwischen Newton

und Huygens über die Natur des Lichtes noch zu gegenwärtig war. Daher wurde jeder Versuch zur Erklärung der beobachteten Erscheinungen mittels einer Korpuskularstrahlung als Rückkehr zu mittelalterlichen Auffassungen betrachtet.

Versetzen wir uns in die Lage dieser Forscher: Sie lebten in den siebziger Jahren des 19. Jahrhunderts und wußten um eine ganze Reihe interessanter Tatsachen, ohne daß eine Verbindung zwischen diesen erkennbar gewesen wäre. Einerseits erinnerte das Erscheinungsbild der Leitfähigkeit von Gasen an die Vorgänge bei der Elektrolyse, doch andererseits passierten ganz und gar unverständliche Dinge: So nimmt die Leitfähigkeit beispielsweise mit der Verminderung der Gaskonzentration im Rohr zu. Außerdem wurde nur ein Strom »negativer« Strahlen entdeckt, »positive« Strahlen dagegen waren nicht aufzufinden.

Es fehlte die Leitidee. Dieser entscheidende Gedanke tauchte erst im Anschluß an eine Reihe von Experimenten des englischen Physikers und Chemikers William Crookes (1832—1919) auf.

Crookes wurde 1832 als Sohn eines Kaufmanns in London geboren. Seine erste Ausbildung erhielt er im Buchladen seines Onkels.

Mit 19 Jahren beendete er das Studium am gerade erst eröffneten Königlichen College für Chemie. Er blieb danach als Assistent seiner Ausbildungsstätte treu. Gleichzeitig besuchte er im Imperial College Vorlesungen Faradays, die in ihm einen unvergeßlichen Eindruck hinterließen.

Im Jahre 1861 entdeckte Crookes das Element Thallium, und 1869 wurde er zum Mitglied der Royal Society gewählt, vor der er am 30. November 1878 über die Eigenschaften der Katodenstrahlen berichtete.

Crookes war sehr vielseitig: Er war Erfinder, Herausgeber der Zeitschrift »Chemical News« und Forscher zugleich. »Er besaß einen außergewöhnlich unabhängigen, originellen und kühnen Verstand und betrachtete die Erscheinungen auf seine Weise; er fürchtete sich nie, eine Meinung zu äußern, die sich grundsätzlich von den Behauptungen aller Anhänger früherer orthodoxer Auffassungen unterschied«, sagte Joseph John Thomson später über ihn.

Im Verlaufe seiner Experimente stellte Crookes ein wesentlich höheres Vakuum in der Röhre her, als es seinen Vorgängern gelungen war. Dabei entstand — von der Katode ausgehend — ein weiterer Dunkelraum, der allmählich

die ganze Röhre ausfüllte, worauf die Anode grünlich aufleuchtete. Jenen Tag des Jahres 1878, an dem dies geschah, kann man als den Geburtstag der Elektronenröhre ansehen, die die Grundlage unserer Fernsehgeräte darstellt. Crookes machte sich jetzt an die sorgfältige Untersuchung der Eigenschaften dieser Strahlung, die er als »strahlende Materie« bezeichnete (ein Begriff, den bereits Faraday 1816 eingeführt hatte). Er ahnte, daß er hier auf eine gänzlich neue Naturerscheinung gestoßen war und schlug vor, sie als »vierten Aggregatzustand« zu bezeichnen, der »weder flüssig noch fest oder gasförmig« ist. Er schrieb: »Bei der Erforschung des vierten Aggregatzustandes, des Strahlungszustandes der Materie, haben wir, wie mir scheint, jene primären Materieatome in den Händen und zugleich im Bereich unserer Forschungen, aus denen, wie man durchaus begründet annimmt, alle Körper der Natur bestehen. Wir sehen, daß die strahlende Materie nach bestimmten Eigenschaften ebenso materiell ist wie z.B. dieser Tisch, in ihren anderen Eigenschaften jedoch eher der Strahlungsenergie ähnelt. So sind wir in der Tat mit jenem Grenzgebiet in Berührung gekommen, wo Materie und Energie ineinander übergehen. Ich denke, daß die bedeutendsten Probleme der Zukunft ihre Lösung eben in diesem Grenzgebiet finden werden; mehr noch: hier liegt, wie mir scheint, die Grenze der gesamten realen Welt überhaupt.«

Um die Kühnheit Crookes' richtig einzuschätzen, muß daran erinnert werden, daß man die gesamte Welt damals in »Materie« und »Äther« unterteilte, wobei diese beiden Dinge als entgegengesetzt und miteinander unvereinbar angesehen wurden: Mit der Materie identifizierte man die Teilchen, und unter Äther verstand man jenes Medium, dessen Schwingungen wir als Lichtstrahlen wahrnehmen.

So sollte also Crookes' strahlende Materie unvereinbare Eigenschaften miteinander vereinbaren: die Eigenschaften des Strahls und der Partikel. Ein halbes Jahrhundert später konnte man sich davon überzeugen, wie recht er hatte. Doch damals »teilte Crookes' Annahme das Schicksal jener Geistesblitze, die Schriftstellern zuweilen erlaubt sind, von der orthodoxen Wissenschaft ihrer Zeit jedoch verspottet werden«, meinte Oliver Lodge, ein Zeitgenosse und Landsmann von Crookes.

Crookes konstatierte im Ergebnis zweifelsfreier Experimente folgende Eigenschaften der »strahlenden Materie«:

Sie breitet sich geradlinig aus; sie verursacht ein Leuchten der Körper und vermag sie sogar zum Schmelzen zu bringen; sie wird im elektrischen und im magnetischen Feld abgelenkt; sie durchdringt Festkörper und legt in der Luft einen Weg von 7 cm zurück, während dieser bei den Atomen nur 0,002 cm beträgt.

Ausgehend von diesen Tatsachen, behauptete Crookes: Die Katodenstrahlen (von ihm »strahlende Materie« genannt) stellen einen Strom schneller negativ geladener Teilchen dar, deren Ausmaße erheblich unter denen der Atome liegen.

Damit wurden alle Eigenschaften der Katodenstrahlen erklärt, auch das Auftreten des Dunkelraums an der Katode: Seine Große ergibt sich aus der mittleren Entfernung (mittleren Weglänge), die die Elektronen zurücklegen, ohne dabei mit Gasatomen zusammenzustoßen; diese Entfernung wächst mit zunehmender Evakuierung des Gases aus dem Rohr. Die entscheidende Bedeutung der Hypothese ist aber darin zu sehen, daß sie zu jenem Leitgedanken wurde, der den notwendigen Halt in einer Vielzahl bekannter Tatsachen gewährte.

Vor den Physikern lag nun die Aufgabe, das »Elektrizitätsatom« herauszufinden und seine Eigenschaften — also Ladung, Masse und Größe — zu bestimmen.

Darüber vergingen fast zwanzig Jahre, und so bedeutende Physiker wie Joseph John Thomson (1856—1940), John Townsend (1868—1957), Wilhelm Wien (1864—1928), George Fitzgerald (1851—1901), Emil Wiechert (1861—1928), Jean Perrin (1870—1942) und Robert Andrews Millikan (1868—1953) verwandten ihre Kräfte darauf, es nachzuweisen. Wir haben hier keine Möglichkeit, ausführlich von den Experimenten der vielen Wissenschaftler zu berichten. Deshalb wollen wir nur verfolgen, wie das hypothetische »Elektrizitätsatom« allmählich reale Eigenschaften gewann, um schließlich zur Grundlage der modernen Physik zu werden.

Im Jahre 1895 bewies Perrin endgültig, daß die Ladung der Katodenstrahlen negativ ist. Im Verlauf der folgenden beiden Jahre wurde festgestellt, daß ihre Geschwindigkeit etwa einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit entspricht, d.h. annähernd 10 000mal so groß ist wie die Geschwindigkeit einer Gewehrkugel oder die Geschwindigkeit der Wärmebewegung der Atome. Außerdem waren diese und alle

übrigen Eigenschaften der Strahlen von der Gaszusammensetzung in der Röhre unabhängig. Dies aber bedeutete, daß die Katodenpartikeln ein unbedingter Bestandteil aller Atome sein mußten.

Im Jahre 1897 schließlich gelang es Joseph John Thomson, die Ladung e und die Masse m eines einzelnen »Elektrizitätsatoms« zu bestimmen.

Die Masse dieser Partikeln ($m=10^{-27}$ g) betrug etwa ein Tausendstel der Masse eines Wasserstoffatoms, und die Ladung ($e=1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb) entsprach fast genau der Ladung eines Wasserstoffions, die bei den Untersuchungen der Elektrolyse gemessen worden war. Dieses Ergebnis überraschte, denn die Elektrolyse und die Leitfähigkeit von Gasen wurde in verschiedenen Wissenschaftszweigen untersucht, die sich unabhängig voneinander entwickelt und in denen sich im Verlauf von Jahrzehnten sogar eigene Begriffe herausgebildet hatten. Plötzlich ergab sich, daß sie eng miteinander verknüpft waren. Solche Erkenntnisse sind für die Physiker stets ein besonderes Ereignis, und wir werden noch mehrfach Gelegenheit haben, ähnliche Verflechtungen innerhalb der Wissenschaft zu beobachten.

Die Geschichte des Elektrons ist ein sehr günstiges Beispiel zum Studium der Logik der Entdeckungen in der heutigen Physik: Von den Beobachtungen ausgehend, schlagen die Wissenschaftler Hypothesen vor, die erneut im Experiment geprüft werden; dieser Prozeß mündet schließlich in einer Theorie, d.h. in der gedrängten Erklärung von Einzelerscheinungen auf der Grundlage weniger allgemeingültiger Prinzipien. Die Hypothese vom Elektron entstand aus den Beobachtungen Faradays, Plückers und Crookes'. Ihre Tragfähigkeit wurde durch Versuche von Joseph John Thomson und anderen Physikern überprüft und bewiesen.

Hendrik Antoon Lorentz (1853—1928) schließlich war von der Realität des Elektrons so überzeugt, daß er auf der Grundlage dieser Hypothese eine Theorie schuf, deren Folgerungen wiederum experimentell geprüft werden konnten.

Dieser Prozeß kennt keine Grenzen und stellt das einzige Verfahren für die Vorwärtsentwicklung der Wissenschaft dar.

Kehren wir nun in das Jahr 1897 zurück, als das erste »Elementarteilchen« nach vierzigjährigen Mühen »Bürgerrecht« erhielt. Es war dies das wichtigste Ereignis in der Physik seit der Anerkennung der Realität des Atoms. In

jenem Jahr erkannte man, daß noch wesentlich kleinere Partikeln als die Atome existieren und daß diese Teilchen Bestandteile aller Atome sind. Es wurde klar, daß nicht nur die Masse, sondern auch die elektrische Ladung eine atomare Struktur besitzt. Dies alles bedeutete, daß in der Natur ein materieller Träger der kleinstmöglichen elektrischen Ladung existiert — das Elektron.

Ebenso wie das Atom fand auch das Elektron keineswegs sofort allgemeine Anerkennung. Im Jahre 1902 hatte Oliver Lodge geschrieben: »... das Elektron ist eine rein hypothetische, vom Atom isolierte Ladung.« Noch 1920 verbot Wilhelm Conrad Röntgen (1845—1923) den Mitarbeitern seines Instituts den Gebrauch dieses Wortes.

Die Physiker indessen, die nicht an der Realität des Elektrons zweifelten, versuchten seine Ladung e und seine Masse m mit größter Sorgfalt zu ermitteln. Ihren Arbeiten (besonders den Arbeiten von Millikan, der zwischen 1909 und 1940 immer wieder zu diesem Problem zurückkehrte), ist es zu danken, daß uns beide Werte heute mit großer Genauigkeit bekannt sind:

$$m = 9{,}109558 \cdot 10^{-28} \text{ Gramm}$$
$$e = 1{,}6020 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb.}$$

Welche Größe besitzt aber ein Elektron? Bis heute können wir diese Frage nicht beantworten. Wir wissen nicht einmal, ob die Fragestellung überhaupt einen klaren Sinn besitzt. Die Eigenschaften des Elektrons erkennen wir aus dem Studium seiner Wechselwirkung mit anderen Partikeln und Feldern. Zum Verständnis der Ergebnisse all dieser Versuche aber genügt uns die ausschließliche Kenntnis von Masse und Ladung des Elektrons, während die Kenntnis seiner Größe hierfür nicht benötigt wird. Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß die Elektronen die Eigenschaft »Größe« überhaupt nicht besitzen. Schließlich kann man auch nicht die Dicke des Äquators angeben, obwohl sich seine Länge messen läßt. Selbst die Möglichkeit, daß die Größe des Elektrons von den Versuchsbedingungen abhängt, darf nicht von vornherein ausgeschlossen werden: auch ein Komet ändert seine Ausdehnung bei der Annäherung an die Sonne, obwohl seine Masse konstant bleibt. Dies alles sind keineswegs überflüssige Fragen, und wir werden noch darauf zu sprechen kommen.

Wir haben soeben jenen schwierigen Weg verfolgt, den die Forscher am Ende des vorigen Jahrhunderts zurücklegten. Es war eine Zeit, in der eine Vielzahl von neuen Erscheinungen aufgedeckt wurde. Damals mußte man von der Einheit der Natur wirklich fest überzeugt sein, um sich nicht im Chaos von Einzeltatsachen und widersprüchlichen Hypothesen zu verlieren.

Jede bedeutende Entdeckung bringt nicht nur die Antwort auf alte Fragen, sondern wirft zugleich auch neue Probleme auf. Die Entdeckung des Elektrons beflügelte die Physiker, aber schon bald ergaben sich neue Fragen. Wie sind die Elektronen im Atom gebunden? Wieviel Elektronen gibt es im Atom? Befinden sie sich in Ruhe, oder bewegen sie sich? Und wenn sie sich bewegen, wie ist ihre Bewegung mit der Strahlung der Atome verknüpft?

Form und Charakter der Fragestellungen änderten sich, und allmählich reduzierten sie sich auf folgendes Problem: Anzahl, Ausmaße und Anordnung der Elektronen im Atom sowie ihr Einfluß auf die Strahlungsvorgänge mußten untersucht werden. Dabei zerbrach sich niemand den Kopf darüber, ob derartige Fragestellungen überhaupt sinnvoll sind. In jener Zeit stellten sich alle das Elektron als Kügelchen von 10^{-13} cm Durchmesser vor, das im Innern des Atoms »irgendwie« befestigt ist oder darin umherschwirrt wie eine Fliege in der Kathedrale.

Zunächst wollte man das Hauptproblem klären: Warum sendet ein Atom nur Wellen von genau bestimmter Länge aus, und wodurch wird die Anzahl dieser verschiedenen Wellen bestimmt? Warum sind es so viele Spektrallinien? Beim Eisenatom beispielsweise beträgt ihre Zahl allein im sichtbaren Bereich des Spektrums über 3000, d.h., 3000 Wellen verschiedener Länge, die das menschliche Auge im Spektrum beobachten kann, werden vom Eisenatom ausgesandt. Wie stets, wenn es an neuartigen Ideen fehlt, versuchte man auch hier, in Analogien zu denken. Ausgehend von der bekannten Tatsache, daß die Schwingungsfrequenz einer mit einem Gewichtsstück belasteten Feder von deren Elastizität abhängt, nahm ein Teil der Physiker an, daß auch die Elektronen an das Atom mittels »irgendwelcher« Federn unterschiedlicher Elastizität gebunden sind. Wird das Atom irgendwie angeregt, schwingen die Elektronen und

senden dabei Licht aus, dessen Frequenz der dieser winzigen Federn entspricht. Daraus folgte nach den Vorstellungen Lockyers, daß die Anzahl der Elektronen im Atom gleich der Anzahl der Linien im Spektrum eines Elements sein müsse. Darüber hinaus dürfte ein Atom dieser Konstruktion genau jene Strahlen am bereitwilligsten absorbieren, die es selbst emittiert. Genau das aber war von Kirchhoff und Bunsen in ihrem berühmten Versuch mit Natriumdämpfen bereits festgestellt worden!

Ungeachtet der Erfolge, die das Modell vom Atom mit elastisch gekoppeltem Elektron erreichte, empfanden viele seine logische Unvollkommenheit. Bald entdeckte man auch direkte Widersprüche zwischen dem Modell und dem Experiment. Joseph John Thomson kam beim Studium der Streuung von Röntgenstrahlen an den Atomen verschiedener Elemente zu dem Schluß, daß die Zahl der Elektronen im Atom verhältnismäßig klein ist und ungefähr der Zahl entspricht, die die Hälfte des Atomgewichtes des Elements ausdrückt. Im Jahre 1904 schlug er sein Atommodell vor, das eine Weiterentwicklung der Hypothese seines Namensvetters William Thomson (Lord Kelvin, 1824—1907) darstellte. Im Innern eines gleichmäßig positiv geladenen kugelförmigen Atoms von 10^{-8} cm Durchmesser »schwimmen« die negativen Elektronen, die quasi-elastisch mit der Kugel verknüpft sind. Die Anzahl der Elektronen ist gleich der Ladung der Kugel, so daß das Atom als Ganzes neutral ist, wie es ja auch sein muß. Das Thomsonsche Modell wurde zu Beginn unseres Jahrhunderts von nahezu allen Physikern anerkannt. Trotz häufiger Meinungsverschiedenheiten waren alle davon überzeugt, daß in der Wissenschaft vom Atom eine neue Epoche angebrochen war.

Rund um das Quant

Die Spektralanalyse

Die Entdeckung der Spektralanalyse durch Kirchhoff und Bunsen fand auch in Kreisen lebhaftes Interesse, die der Wissenschaft fern standen, was damals nicht eben häufig war. Wie stets in solchen Fällen »entdeckten« eifrige Amateure viele Wissenschaftler, die die Spektralanalyse angeblich lange vor Kirchhoff und Bunsen entdeckt hatten. Man nannte den französischen Wissenschaftler Jaques Ber-

nard Foucault (1819—1868), der zehn Jahre früher ein analoges Experiment vorgeschlagen haben sollte, den berühmten Astronomen John Frederik Herschel (1792—1871), den Erfinder der Papierfotografie Henry Fox Talbot (1850 bis 1877) und noch viele andere. Manche Engländer behaupteten noch Jahre später, die Spektralanalyse sei von ihrem berühmten Landsmann George Gabriel Stokes (1819—1903) entdeckt worden, der in einem Gespräch mit William Thomson die Annahme ausgesprochen habe, daß die D-Linie im Sonnenspektrum bei Durchgang von weißem Licht durch Natriumdämpfe in der Gashülle der Sonne entstehe. Stokes wies derartige Ambitionen in seiner Bescheidenheit weit von sich; gewiß, er habe Gedankengänge dieser Art bei Vorlesungen vor seinen Studenten erläutert, sie jedoch für allgemein bekannt und nicht besonders wichtig gehalten.

Im Unterschied zu ihren zahlreichen Vorgängern hatten Kirchhoff und Bunsen die Bedeutung ihrer Entdeckung sofort erkannt. Sie machten sich als erste wirklich klar (und konnten darum auch alle anderen so leicht davon überzeugen), daß die Spektrallinien Charakteristika der Atome eines Stoffes und nicht Besonderheiten der Prismakonstruktion oder der Eigenschaften der Sonnenstrahlung sind. Kirchhoff stellte sogleich einen ausführlichen Atlas der Fraunhoferschen Linien des Sonnenspektrums zusammen und ermittelte daraus die chemische Zusammensetzung der Sonne. Übrigens zog er sich bei dieser Arbeit ein Augenleiden zu, so daß er sie 1861 aufgeben mußte.

Geschichte und Inhalt der Entdeckung der Spektralanalyse könnten Gegenstand eines interessanten Berichtes sein, für den wir hier allerdings leider keinen Platz haben. Erwähnt sei nur ein interessantes Vorkommnis, das sich kurz nach Kirchhoffs und Bunsens Entdeckung ereignete.

Am 18. August 1868 beobachtete der französische Astronom Janssen bei einer Sonnenfinsternis in Indien eine gelbe Linie unbekannter Herkunft im Spektrum der Sonnenkorona. Zwei Monate später erfand der englische Physiker Lockyer ein Verfahren zur Beobachtung des Koronaspektrums, bei dem man nicht erst eine Sonnenfinsternis abzuwarten brauchte. Mit Hilfe dieses Verfahrens entdeckte er die gleiche gelbe Linie. Das noch unbekannte Element, das diese Linie aussandte, bezeichnete er als »Helium«, d.h. als Sonnenelement. Beide Wissenschaftler berichteten in Briefen an die Französische Akademie der Wissenschaften

über ihre Entdeckung; die Briefe trafen gleichzeitig ein und wurden am 26. Oktober 1868 auf einer Sitzung der Akademie verlesen. Dieses Zusammentreffen verblüffte die Mitglieder der Akademie so sehr, daß sie beschlossen, aus Anlaß dieses Ereignisses eine goldene Gedächtnismedaille prägen zu lassen; auf der einen Seite waren Janssen und Lockyer im Profil dargestellt, während die andere Seite der Medaille ein Bild des Gottes Apollo im antiken Kampfwagen sowie die Aufschrift »Analyse der Sonnenprotuberanzen« trug.

Auf der Erde wurde das Element Helium erst 1895 durch William Ramsay (1852—1916) entdeckt.

Die kinetische Gastheorie

Im 19. Jahrhundert unternahmen viele Wissenschaftler Versuche, die physikalischen Eigenschaften der Körper zu erklären, ohne jedoch in die Einzelheiten des inneren Aufbaus der Atome einzudringen. Diese Versuche basierten auf folgendem Grundgedanken: Die Atome, aus denen alle Stoffe in der Natur bestehen, befinden sich nicht in Ruhe, sondern in ständiger Bewegung.

Es zeigte sich, daß diese Vorstellung zu einer großen Zahl von Folgerungen führt, wenn man sie in der Sprache der Mathematik formuliert. Versuche dieser Art waren seit Newton, der das Gasgesetz von Robert Boyle (1627—1691) und Edmé Mariotte (1620—1684) mathematisch erklären wollte, wiederholt unternommen worden. Als der eigentliche Begründer der kinetischen Gastheorie ist indessen Daniel Bernoulli (1700—1782) anzusehen, der 1738 in seinem Werk »Hydrodynamica« die »Bernoullische Gleichung« der Strömungslehre ableitete. Ungefähr zur gleichen Zeit, in den Jahren 1742 bis 1747, hatte Lomonossow ähnliche Gedanken entwickelt. Aber sowohl Bernoullis als auch Lomonossows Arbeiten auf diesem Gebiet blieben lange Zeit unbeachtet.

Im 19. Jahrhundert wurde die kinetische Gastheorie ein zweites Mal geboren, und auch dieser zweite Versuch mißglückte zunächst. Im Jahre 1821 schlug der Engländer John Herapath (1790—1868) erneut die Hypothese der kinetischen Gastheorie vor. Doch wiederum schenkte man ihr keine Beachtung. Ein Vierteljahrhundert später, im Jahre 1845, sandte John James Waterson (1811—1833), Marineausbilder

der Ostindischen Kompanie in Bombay, ein umfangreiches Traktat über die kinetische Theorie der Gase an die Royal Society nach London. Seine Schrift wurde nicht gedruckt, weil die Gutachter meinten, sie sei »... ein Unfug, der nicht einmal zur Verlesung vor der Royal Society tauge«. Erst 1892 fand Lord Rayleigh das Manuskript Watersons in den Archiven und veröffentlichte es.

Doch Herapaths und Watersons Ideen übten auf die Arbeiten James Prescott Joules (1818—1889) einen entscheidenden Einfluß aus. Joule schätzte 1851 als erster die Geschwindigkeit der Gasmoleküle ab. Diese war unerwartet groß. Für ein Wasserstoffatom beispielsweise beträgt sie etwa 1800 m/s. Sie ist damit doppelt so groß wie die Geschwindigkeit eines Artilleriegeschosses.

Die Weiterentwicklung der kinetischen Gastheorie verlief nun rasch: Sie wurde im Jahre 1856 von August Karl Krönig (1822—1879) und 1857 von Rudolf Emanuel Clausius (1822—1888) wiederentdeckt und um 1860 von James Clerc Maxwell (1831—1879) sowie um 1878 von Ludwig Boltzmann (1844—1906) in ihren bis heute gültigen Grundlagen entwickelt.

Schon damals schien es, als habe die Atomhypothese nun endgültig gesiegt. Aber nur zehn Jahre später kam sie wieder »aus der Mode«. Boltzmanns Arbeiten »stießen eher auf Verwunderung als auf Anerkennung«. Man bezeichnete ihn sogar als »die letzte Stütze der Atomistik«.

Diese neue Welle des Mißtrauens fand Eingang in viele Lehrbücher und wissenschaftliche Arbeiten. Noch 1898 schrieb eine wissenschaftliche Zeitschrift, daß »... die kinetische Theorie ebenso falsch ist wie die mechanische Gravitationstheorie«.

Die zu Beginn des 20. Jahrhunderts ausgelöste Lawine von Entdeckungen beseitigte allerdings alle diese Zweifel restlos. Seit dieser Zeit stellt die kinetische Gastheorie eine der fundamentalen Theorien über die Struktur der Materie dar, mit deren Hilfe man die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit der Körper, die Elastizität und Viskosität der Gase und vieles andere erklären kann.

Michail Wassiljewitsch Lomonossow

Rußlands erster Wissenschaftler, Michail Wassiljewitsch Lomonossow, wurde am 8. November 1711 auf einer der Inseln in der Nördlichen Dwina in der Nähe von Cholmogory

geboren. Im Winter 1731 kam er nach Moskau. Hier begann er zu studieren. Er vollbrachte in den folgenden Jahrzehnten ein gewaltiges Werk. Am 4. April 1765 starb Lomonossow, der Mitglied der Russischen Akademie der Wissenschaften und Ehrenmitglied der Akademien von Stockholm und Bologna war.

Lomonossow begann als erster Gelehrter in Rußland, seine Vorlesungen in russischer Sprache zu halten. Dazu mußte allerdings zunächst eine wissenschaftliche Terminologie entwickelt werden, und Lomonossow war es, der sie schuf. Er schrieb das erste russische Lehrbuch der Mineralogie und legte den Grundstein der modernen russischen Versform; er leitete die Arbeiten zur Entwicklung einer Landkarte von Rußland und schrieb das Werk »Über die Vermehrung und Bewahrung des russischen Volkes«. Aus selbst angefertigten farbigen Gläsern schuf er Mosaikbilder. Er rüstete eine Expedition zur Auffindung des Seeweges nach Indien entlang der russischen Nordküste aus. Er konstruierte Instrumente für die Navigation auf hoher See und richtete das erste chemische Laboratorium in Rußland ein.

Unter aktiver Beteiligung Lomonossows wurde 1755 in Moskau die erste russische Universität gegründet, die später seinen Namen erhielt.

Lomonossows naturwissenschaftliche Anschauungen standen auf der Höhe seines Jahrhunderts oder eilten diesem oftmals weit voraus. Er war ein konsequenter Anhänger der Atomistik. Vierzig Jahre vor Lavoisier setzte Lomonossow bei seinen chemischen Untersuchungen systematisch auch die Waage ein. Seinen berühmten Versuch, Metalle in zugeschmolzenen Retorten zu glühen, führte er siebzehn Jahre vor Lavoisier aus. Dreißig Jahre vor Herschel entdeckte er die Venusatmosphäre. Er hatte es nicht leicht: Rußland war damals ein fast ausschließlich von Analphabeten bewohnter Feudalstaat, und die Beschäftigung mit der Wissenschaft genoß keinerlei Ansehen. Lomonossow mußte sich bei Hofe um Unterstützung bemühen und vieles tun, was mit der Wissenschaft nichts gemein hatte; trotzdem wurde er nicht müde, vor seinen Studenten zu wiederholen: »Was kann angenehmer und für unsere Nachkommen nützlicher sein als physikalisch-chemische Experimente, die wir in jener Zeit ausführen, welche uns nach Erledigung wichtigerer Dinge verbleibt.«

Im Jahre 1742 schrieb er seine Dissertation »Über un-

belebte physikalische Partikeln, aus denen sich die Körper in der Natur aufbauen und die die hinreichende Begründung aller Einzeleigenschaften liefern«.

Darin heißt es u. a.: »Komplizierte (zusammengesetzte) Körper bestehen aus einer gewissen Zahl von Bestandteilen, in die sie zerfallen...«

»... Alle Körper bestehen aus unbelebten physikalischen Partikeln, die die grundlegenden Einzeleigenschaften enthalten und die bei Bewegung nicht in andere, kleinere Partikeln aufgeteilt werden können...«

»...Wir bezeichnen als physikalische Monade solche kaum bemerkbaren physikalischen Teilchen, die sich bei ihrer Bewegung nicht in andere, noch kleinere zerteilen. Wir bestreiten nicht die Möglichkeit, in Gedanken die Materie unendlich oft zu teilen, doch wir nehmen es als möglich an, ohne Fehler zu befürchten, bei physikalischen Problemen ohne diese Annahme auszukommen. Ebenso kümmern wir uns nicht um die über die Materie verstreute Leere (wenn letztere überhaupt existiert); mit ihr ist überhaupt kein anderer Begriff als die räumliche Ausdehnung verbunden, darum besitzt sie keinerlei Eigenschaften und kann ihrerseits dem Wesen und der Natur der Dinge nichts geben, unabhängig davon, ob sie existiert oder nicht.«

»... Die Gestalt der physikalischen Monaden ist unveränderlich...«

Die Ursache für Wärme und Kälte sah Lomonossow »in der wechselseitigen Bewegung unbelebter physikalischer Teilchen«. Im Jahre 1744 legte er der Akademie der Wissenschaften die Dissertation »Überlegungen zur Ursache von Wärme und Kälte« vor, aus der einige Auszüge angeführt werden sollen:

»Es ist sehr wohl bekannt, daß Wärme durch Bewegung erzeugt wird: Reibt man die Hände aneinander, so werden sie warm, Holz fängt durch Reibung Feuer, und schlägt man mit einem Kieselstein auf Stahl, dann sprühen Funken; schmiedet man Eisen mit raschen, starken Schlägen, so steigt dabei seine Temperatur...

Aus all diesem ist ganz offensichtlich, daß die Wärme in der Bewegung ihre hinreichende Begründung findet. Und da ohne Materie keinerlei Bewegung stattfinden kann, ist es notwendig, daß die hinreichende Begründung der Wärme in der Bewegung irgendwelcher Materie bestehe...«

»Die innere Bewegung kann man sich durch dreierlei

Der endgültige Sieg

Man sagt gelegentlich, der Mensch habe die Hälfte seines Wissens über die Umwelt schon bis zu seinem fünften Lebensjahr erworben. Nach weiteren zehn Jahren wisse er über die ihn umgebende Welt fast alles, und seine weiteren Erkenntnisse — mit Ausnahme von Spezialwissen — würden nur sehr langsam ergänzt, möglicherweise deshalb, weil er zu dieser Zeit bereits eine schädliche Angewohnheit der Erwachsenen angenommen hat, immer dann, wenn er etwas Neues erfährt, unbedingt zu fragen: »Aber wozu soll das denn gut sein?«

Bei einer ersten Bekanntschaft mit der Quantenmechanik ist eine derartige Angewohnheit sehr hinderlich, weil in diesem Stadium des Erkenntnisprozesses weder das Wesen der atomaren Erscheinungen klar zutage tritt noch ihre spezifische Bedeutung für das allgemeine Weltbild deutlich sichtbar ist, ganz zu schweigen von einem Verständnis ihres tieferen Sinns.

In dieser Situation muß man sich genau so verhalten wie die Kinder, wenn sie sprechen lernen. Sie hören anfangs unverständliche Töne, wiederholen danach einzelne Worte — ohne sie zu begreifen — und bemerken schließlich, daß zwischen diesen Worten eine logische Verbindung besteht. Allmählich überzeugen sie sich davon, daß die Worte an und für sich häufig gar nichts bedeuten, doch andererseits gelegentlich einen ganz unerwarteten Sinn erhalten, sofern sie in einer bestimmten Anordnung ausgesprochen werden.

Selbstverständlich verstreicht noch viel Zeit, ehe die Kinder auch die feinsten Gedankenregungen und subtilsten Gefühle in einfachen Kombinationen gewöhnlicher Worte zu erfassen lernen. Im Grunde genommen werden sie erst dann wirklich erwachsen.

In diesem Kapitel werden wir viele neue Tatsachen über Atome, Strahlen und Quanten erfahren. Die Auswahl der Fakten und jene Sicherheit, mit der wir sie hier interpre-

Gründe hervorgerufen denken: 1. Entweder ändern die kaum bemerkbaren Teilchen ständig ihren Platz, oder 2., sie drehen sich ständig an ein und demselben Platz, oder aber 3., sie schwingen in einem kaum bemerkbaren Raum in einer kaum bemerkbaren Zeit ständig vor und zurück. Die erste Bewegung heißt geradlinig, die zweite nennt man eine Drehung, und die dritte stellt eine Schwingung dar...«

»Aus unserer Theorie ergeben sich folgende Schlußfolgerungen: 1. Für die Wärmebewegung sind kugelförmige Korpuskeln der Stoffe am geeignetsten... 2. Wie jede Bewegung hat man sich auch dies bei der Wärmebewegung vorzustellen... 3. Die Teilchen der warmen Körper müssen sich schneller drehen, die der kälteren langsamer.«

In den Protokollen der Akademie ist über diese Arbeit ein Gutachten erhalten geblieben, in dem es heißt, daß »der Adjunkt Lomonossow sich zu früh an die Verfertigung einer Dissertation gemacht habe«. Das niedrige Niveau der damaligen Akademie und die in der Folgezeit fortschreitende Isolierung Rußlands führten dazu, daß Lomonossows wissenschaftliche Werke keinen Einfluß auf die spätere Entwicklung der Wissenschaften hatten. Sie gerieten in Vergessenheit, und im Gedächtnis der Nachfahren lebte Lomonossow über anderthalb Jahrhunderte nur als Dichter fort. Erst später, aus Anlaß seines 200. Geburtstags, förderte man Lomonossows wissenschaftliche Werke aus den Archiven zutage und begriff erst jetzt seine Größe.

tieren, mögen anfangs vielleicht nicht sehr begründet erscheinen — wie auch ein Kind die Handlungen eines Erwachsenen nicht immer einzusehen vermag. Wenn wir die ungewohnte Realität der Atomphysik erstmals erfahren, geraten wir wider Willen in die Lage von Kindern, die eine gänzlich neue Welt betreten.

Ohne Tatsachen gibt es bekanntlich keine Wissenschaft. Um uns diese Tatsachen in der bestmöglichen Weise anzueignen, wollen wir es vorübergehend den Kindern gleichtun, die stets mehr wissen als verstehen.

Man bezeichnet das Ende des vorigen und den Beginn unseres Jahrhunderts häufig als die große Zeit der Physik. Es war eine Zeit, in der jedes Jahr neue grundlegende Entdeckungen brachte. Eine dieser Entdeckungen ist mit der bereits früher erwähnten Crookesschen Röhre verknüpft. Am 2. November 1895 entdeckte Wilhelm Conrad Röntgen (1845—1923) im Laboratorium der Universität Würzburg bei der Untersuchung der Katodenstrahlen eine neue Strahlung, die an jener Stelle der Anode entstand, die vom Elektronenstrahl getroffen wurde.

Die Eigenschaften dieser Strahlung waren ungewöhnlich. Sie durchdrang ohne Schwierigkeiten den menschlichen Körper, und auch die geschlossenen Türen eines Panzerschrankes bildeten kein Hindernis. Erst 1912 schickten die deutschen Physiker Walter Friedrich (1883—1971) und Paul Knipping (1883—1935) auf einen Vorschlag Max von Laues (1879—1960) diese Strahlen durch einen Kristall. Sie entdeckten dabei deren Fähigkeit zur Interferenz und Beugung. Dies aber bedeutete, daß die X-Strahlen, wie sie Röntgen zunächst bezeichnete, keinen Partikelstrom, sondern Wellen darstellen. Allerdings sind sie sehr kurzwellig. Ihre Wellenlänge liegt zwischen 10^{-7} und 10^{-10} cm.

Schon eine dieser beiden Entdeckungen hätte ausgereicht, den gewohnten Arbeitsrhythmus aller Laboratorien der Welt durcheinanderzubringen. Doch die Epoche der Entdeckungen hatte damit gerade erst begonnen. Einige Monate später entdeckte Antoine Henri Becquerel (1852—1908) einen neuen, noch merkwürdigeren Strahlungstyp. Diese Strahlung entsprang spontan einem Brocken Uranerz, und sie bestand aus positiv geladenen Partikeln, die Ernest Rutherford (1871—1937) als Alphateilchen (α-Teilchen) bezeichnete. Sie waren viermal so schwer wie ein Wasserstoffatom, wobei

ihre Ladung entgegengesetzt gleich der Ladung zweier Elektronen war.

Einige Stoffe, z.B. Zinksulfid, begannen zu leuchten, wenn sie von einem Alphateilchenstrom getroffen wurden. Diese Entdeckung ermöglichte William Crookes 1903 die Erfindung des Szintillographen, eines Gerätes, mit dem man die Lichtblitze einzelner Alphateilchen beobachten kann, die auf einen Zinksulfidschirm auftreffen.

Heute sind diese beiden Endeckungen allgemein bekannt. Wir haben sie hier erwähnt, weil ohne sie die Geschichte des Atoms unvollständig wäre.

Die Atome sind fast leer

Zu Beginn unseres Jahrhunderts gab es in der Physik die unterschiedlichsten und phantastischsten Vorstellungen vom Aufbau des Atoms. Beispielsweise behauptete Ferdinand Lindemann, Rektor der Münchner Universität, im Jahre 1905, daß ein Sauerstoffatom ringförmig sei, während ein Schwefelatom die Form eines Fladens besitze. Auch die Theorie des »Wirbelatoms« von Lord Kelvin lebte fort, derzufolge das Atom eine ähnliche Struktur haben sollte wie Rauchringe, die kunstfertige Raucher gelegentlich produzieren. Selbst Kirchhoff bezeichnete diese Theorie als ganz vortrefflich, weil sie jede andere ausschließe.

Die Mehrzahl der Physiker allerdings war einer Meinung mit J. J. Thomson: Ein Atom ist eine Kugel von ungefähr 10^{-8} cm Durchmesser mit gleichmäßig darin verteilter positiver Ladung. In ihrem Innern schwimmen negativ geladene Elektronen, deren Größe etwa 10^{-13} cm beträgt. »J. J.« (»Dshej-dshej«), wie ihn seine Schüler nannten, war von seinem eigenen Modell nicht sehr überzeugt. Manche Physiker allerdings stellten sich das Atom gänzlich anders vor. Unter ihnen war Johnstone Stoney (1826—1911), der bereits 1891 annahm, daß sich die Elektronen rings um das Atom bewegen, ähnlich wie die Planetenbegleiter. Auch Jean Perrin (1870—1942), der im Jahre 1901 versuchte, sich eine »nuklear-planetare Struktur des Atoms« vorzustellen, und der japanische Physiker Hantaro Nagaoka gehörten dazu. Im Jahre 1903 schrieb dieser, daß »... die Räume im Innern des Atoms im Vergleich zur Größe der elektrischen Partikeln, die das Atom bilden, außergewöhnlich groß, um nicht zu sagen riesig sind«. »Das Atom«, so meinte er, »stellt eine

Art kompliziertes astronomisches System dar, ähnlich dem Ring des Saturns.« Diese Auffassungen fanden bei vielen Zustimmung. Zu ihnen gehörten der englische Physiker Sir Oliver Lodge, der französische Physiker Paul Langevin (1872—1946), der norwegische Wissenschaftler Karl Anton Bjerknes (1825—1903) — dieses Verzeichnis ließe sich noch weiter fortsetzen. Bereits Hendrik Antoon Lorentz (1853 bis 1928) und Joseph Larmor (1857—1942) haben 1896 für die Erklärung des Zeemaneffektes, der Aufspaltung von Spektrallinien im Magnetfeld, die Idee einer dem Planetensystem ähnlichen Struktur des Atoms herangezogen.

Andere vertrauten solche Gedanken nur ihrem Tagebuch an, beispielsweise Pjotr Nikolajewitsch Lebedew (1866 bis 1912). Im Jahre 1887 kam er zu der Überzeugung, daß die Strahlungsfrequenz eines Atoms von der Umlauffrequenz des Elektrons auf seiner Bahn bestimmt wird.

Doch kein einziger Anhänger des Atommodells, das dem Planetensystem ähnelt, vermochte das Grundproblem zu lösen, nämlich die Stabilität eines Systems zu erklären, das aus einem positiven Kern sowie aus negativ geladenen Elektronen besteht, die um den Kern kreisen.

Entsprechend den Gesetzen der klassischen Elektrodynamik strahlt ein Elektron, das sich auf einer Kreisbahn bewegt, Energie ab. Kennt man die Ausmaße des Atoms, dann lassen sich leicht die Umlaufgeschwindigkeit des Elektrons und die Größe der Zentrifugalbeschleunigung abschätzen. Letztere beträgt ungefähr 10^{25} cm/s^2. Bei einer solchen Beschleunigung muß die Strahlung so intensiv sein, daß das Elektron schon nach 10^{-8} s in den positiven Kern hineinstürzt. Das Planetensystem des Atoms hört damit zu existieren auf.

Doch nichts dergleichen geschieht in der Natur: Das Atom ist nicht nur als System stabil, sondern besitzt die Fähigkeit zur Reproduktion seiner Struktur nach einer Zerstörung. Das alles spricht auf den ersten Blick zugunsten des Atommodells von Thomson. Dennoch gilt seit über 200 Jahren in der Physik der Grundsatz, daß die endgültige Wahl zwischen mehreren Hypothesen nur mit Hilfe des Experiments getroffen werden kann. Dieses Experiment unternahm im Jahre 1919 Ernest Rutherford (1871—1937) zusammen mit seinen Assistenten.

Stellen Sie sich einen korpulenten, temperamentvollen Menschen vor, der gezwungen ist, in einem dunklen Zimmer

zu sitzen und ins Mikroskop zu starren, um auf dem Schirm des Szintillographen die Lichtblitze (Szintillationen; lateinisch scintilla, der Funke) zu zählen, die von den Alphateilchen verursacht werden! Es ist eine Arbeit, die zur völligen Erschöpfung führt, denn schon nach zwei Minuten sind die Augen total überfordert. Rutherford wurde in seiner Arbeit von dem erfahrenen Experimentalphysiker Hans Geiger (1882—1945) und von dem Laboranten Ernest Marsden (geb. 1889) unterstützt. Die Apparatur war einfach: eine Ampulle mit Radium C als Quelle der Alphateilchen, eine Blende, die nur einen begrenzten, engen Strahl auf einen Zinksulfidschirm fallen läßt, sowie ein Mikroskop, mit dem man die Szintillation der Alphateilchen auf dem Schirm beobachtete. Hat man an einer bestimmten Stelle des Schirms ein Aufblitzen festgestellt, so läßt sich daraus aber noch nicht der Ort für die nächste Szintillation vorhersagen. Die Szintillationen erfolgen regellos, aber doch so, daß auf dem Bildschirm insgesamt eine verhältnismäßig scharfe Abbildung des Blendenspaltes entsteht.

Bringt man in den Strahlengang der Alphateilchen dagegen eine Metallfolie, dann erhält man auf dem Bildschirm statt einer scharfen Abbildung des Spaltes nur einen verschwommenen Streifen. Dieser Streifen ist bloß ein wenig breiter als die im ersten Fall erhaltene Abbildung des Spaltes: Die Alphateilchen wurden im Mittel nur um zwei Grad aus ihrer geradlinigen Bahn abgelenkt (Abb. 6a). Eine einfache Rechnung zeigte nun, daß man zur Erklärung selbst dieser geringfügigen Ablenkung annehmen muß, daß in den Atomen der Metallfolie ungeheure elektrische Felder mit einer Stärke von über 200 000 V/cm entstehen können.

In der positiv geladenen Kugel des Thomsonschen Atoms können solche Spannungen nicht auftreten. Zusammenstöße mit Elektronen zählen ebenfalls nicht, da das Alphateilchen mit seiner Geschwindigkeit von 20 km/s sich im Vergleich zu den Elektronen wie eine Kanonenkugel neben einer Erbse ausnimmt. Trotzdem wurden die Bahnen der Alphateilchen verändert. Auf der Suche nach einer Erklärung schlug Rutherford vor, einmal nachzuprüfen, ob Alphateilchen vielleicht auch von der Folie reflektiert werden. Vom Standpunkt des Thomsonschen Modells aus erschien diese Annahme gänzlich sinnlos: Eine Kanonenkugel kann nicht von einer Erbse zur Umkehr gebracht werden. Das Ergeb-

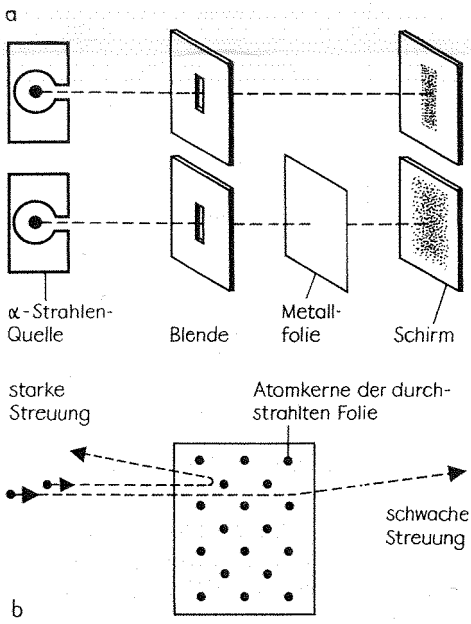

Abb. 6. Streuung von Alphateilchen an einer Metallfolie (a) und Erklärung durch Rutherford (b)

nis war eindeutig, wenn auch unerwartet: Alphateilchen wurden von der Folie z.T. reflektiert (Abb. 6b).

Es vergingen weitere zwei Jahre, in denen Geiger und Marsden über eine Million Szintillationen auszählten und dabei bewiesen, daß im Mittel nur eines von etwa 8000 Alphateilchen reflektiert wird.

Nun erst, am 7. März 1911, hielt Rutherford vor der Philosophischen Gesellschaft von Manchester seinen Vortrag über »Die Streuung von Alpha- und Betastrahlen und die Struktur des Atoms«. An jenem Tag erfuhren die Zuhörer, daß das Atom dem Sonnensystem ähnelt: Es besteht aus einem Kern und Elektronen, die in einer Entfernung von ungefähr 10^{-8} cm um den Kern kreisen. Die Ausmaße des Kerns sind sehr gering. Sie betragen nur 10^{-13} bis 10^{-12} cm, doch enthält er praktisch die gesamte Atommasse. Die Kernladung ist positiv und der Größe nach etwa gleich dem halben Atomgewicht des Elements.

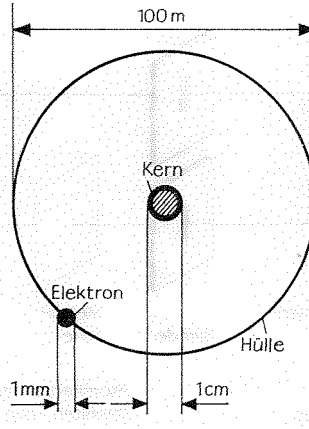

Abb. 7. Größenverhältnisse im Atom

Der Vergleich mit dem Sonnensystem war nicht zufällig gewählt: Der Sonnendurchmesser ($1{,}4 \cdot 10^6$ km) steht zur Größe des Sonnensystems ($6 \cdot 10^9$ km) etwa im gleichen Verhältnis wie der Kerndurchmesser ($\approx 10^{-12}$ cm) zur Atomgröße ($\approx 10^{-8}$ cm).

Die Menschen gewöhnen sich sehr schnell an neue Begriffe. Wir verweisen z.B. heute oft auf den Fernsehapparat, wenn wir erklären wollen, was Elektronik ist, oder auch auf die Lokomotive, wenn wir Beispiele aus der Mechanik brauchen. Darum fällt es uns auch schwer, das Unverständnis zu begreifen, mit dem damals bekannte Wissenschaftler, die sich von ihrem Verstand her durchaus mit Rutherford messen konnten, neuen Ideen begegneten. Heute erscheint uns alles ganz klar: Das Alphateilchen wird einfach von den Atomkernen reflektiert. An dieses Bild gewöhnen wir uns fast von Kindesbeinen an. Um diese für uns heute selbstverständliche Darstellung zu entwerfen, bedurfte es jedoch dereinst wissenschaftlicher Kühnheit, die auf exaktem Wissen beruhte. Ehe sie Allgemeingut werden konnte, mußten jedoch nicht nur über eine Million Szintillationen ausgezählt werden; es bedurfte vielmehr, wie Geiger am Ende seines Lebens in seinen Erinnerungen schrieb, der Überwindungen von »Schwierigkeiten, deren Sinn wir heute einfach nicht mehr zu begreifen imstande sind«. Zuer mußte ja im Verlauf eines Jahrzehnts bewiesen werd

daß Alphateilchen nichts anderes sind als Heliumatome, die zwei Elektronen verloren haben. Dieser Beweis war nicht einfach, und Rutherford erhielt 1908 für seine Forschungsarbeiten über die Chemie radioaktiver Stoffe, bei deren Zerfall Alphateilchen entstehen, den Nobelpreis. Das Rutherfordsche Atommodell wurde von den Physikern zurückhaltend aufgenommen. Auch er selbst beharrte im Verlauf der nächsten Jahre nicht mit allzu großem Nachdruck auf seinem Modell, obwohl er von der Fehlerlosigkeit seiner Experimente überzeugt war, die zu dem Modell geführt hatten. Die Ursache dafür war noch immer die gleiche: Wenn man der Elektrodynamik Glauben schenkte, konnte ein solches System nicht existieren, da das rotierende Elektron unvermeidlich und sehr rasch in den Kern hineinstürzen mußte. So stand man vor der Wahl: Entweder die Elektrodynamik oder das Planetenmodell des Atoms! Die Physiker entschieden sich stillschweigend für die Elektrodynamik. Sie taten es stillschweigend, weil man Rutherfords Experimente weder übersehen noch widerlegen konnte. Die Atomphysik war in eine Sackgasse geraten. Erst Niels Bohr (1885 bis 1962) konnte den Ausweg zeigen.

Balmer und die Zahlen

Unabhängig von der Hypothese über die Atomstruktur hatten die Wissenschaftler bereits frühzeitig begriffen, daß man Erkenntnisse über das Atom aus seinem Linienspektrum gewinnen kann (so, wie ein Musiker aus dem Ton einer Saite ihre Länge bestimmt und aus dem Akkord das Instrument erkennt). In der Physik führen alle Untersuchungen im Endeffekt zu Messungen. Deshalb mußte man zuerst lernen, Wellenlängen mit größtmöglicher Genauigkeit zu messen, d.h., man mußte die Struktur des Linienspektrums noch gründlicher untersuchen, als es Fraunhofer getan hatte.

Der Prismenspektrograph von Kirchhoff und Bunsen war dazu allerdings nicht mehr geeignet. Das Glasprisma wurde durch ein Beugungsgitter ersetzt, das Henry Rowland (1848—1901), ein Vertreter der damals noch jungen amerikanischen Wissenschaft, wesentlich verbessert hatte. Mit Hilfe dieses Gerätes wurden von Carl Runge (1856—1927), Heinrich Kayser (1853—1940) und besonders durch Arbeiten im Laboratorium von Friedrich Paschen (1865—1947) in Tübingen Zehntausende von Spektrallinien verschiedener Ele-

mente exakt gemessen und sorgfältig in langen Tabellen erfaßt. Diese Arbeit beanspruchte mehrere Jahrzehnte. (Bis 1913 betrug die Gesamtzahl der Arbeiten über die Spektralanalyse bereits mehr als 50 000.) Insbesondere hatte sich herausgestellt, daß die berühmte gelbe D-Linie im Natriumspektrum aus zwei sehr nahe beieinanderliegenden Linien besteht: D_1=589,59236 nm und D_2=588,99504 nm. (Die Abkürzung nm heißt Nanometer. 1 nm=10^{-9} m · 0,1 nm entspricht etwa dem Durchmesser des Atoms.)

Das Ziel jeder Wissenschaft besteht allerdings nicht in der bloßen Anhäufung von Tatsachen, sondern im Auffinden von Beziehungen zwischen den verschiedenen Erscheinungen und in der Aufklärung der darin zum Ausdruck kommenden Gesetzmäßigkeiten. Es war allen klar, daß diese langen Tabellen ein riesiges Informationsvolumen über die Atomstruktur enthielten. Doch wie sollte man an diese Informationen herankommen, um sie nutzen zu können?

Der erste Schritt ist stets schwierig und wird oft kaum bemerkt. Das ist auch der Grund dafür, daß wir von dem Schweizer Physik- und Mathematiklehrer Johann Jacob Balmer (1825—1898), der als erster ein System in diesem Chaos von Zahlen sah, so sehr wenig wissen. Balmer war bereits sechzig Jahre alt, als er herausfand, daß vier Linien im sichtbaren Teil des Wasserstoffspektrums nicht willkürlich angeordnet sind, sondern eine Serie bilden, die sich durch folgende Formel beschreiben läßt:

$$\lambda = b\frac{k^2}{k^2 - n^2}.$$

Hierin ist n=2, k=3, 4, 5, 6, b=364,56 nm.

Diese einfache, exakte Beziehung verdient größte Aufmerksamkeit.

Betrachten Sie bitte folgende Tabelle, die Balmer 1885 zusammenstellte. In der ersten Spalte sind die Wellenlängen der vorhin erwähnten vier Spektrallinien angegeben (in der früheren Einheit Å, in Klammern in nm), wie sie sich bei der Berechnung aus Balmers Formel ergeben. In der zweiten Spalte stehen die Wellenlängen, die kurz zuvor durch sehr sorgfältige Messungen des schwedischen Physikers Jonas Ångström (1814—1874) ermittelt worden waren. Die Übereinstimmung der gemessenen und der berechneten Werte ist verblüffend. Sie konnte nicht zufälliger Natur

Wellenlänge, berechnet von Balmer	Wellenlänge, gemessen von Ångström	n	k
6562,08 (656,208)	6562,1 (656,21)	2	3
4860,80 (486,080)	4860,74 (486,074)	2	4
4340,0 (434,00)	4340,1 (434,01)	2	5
4101,3 (410,13)	4101,2 (410,12)	2	6

sein, und deshalb löste Balmers Entdeckung eine ganze Kette neuer Untersuchungen aus.

Zuweilen wird Balmer als ein wunderlicher Schullehrer dargestellt, der einfach aus Langeweile die verschiedensten Zahlen so lange multiplizierte bzw. dividierte, bis er rein zufällig auf einfache Verbindungen zwischen ihnen stieß. Das ist falsch. Er war ein hochgebildeter Mann, der eine Reihe von wissenschaftlichen Arbeiten zu verschiedenen Problemen der darstellenden Geometrie verfaßte und sich ständig mit den kompliziertesten Problemen der Erkenntnistheorie beschäftigte. So veröffentlichte er beispielsweise 1868 eine Arbeit, in der er versuchte, das Verhältnis zwischen der wissenschaftlichen Forschung und den philosophischen Systemen zu klären. Er selbst stand seit seiner Kindheit unter dem Einfluß der Pythagoreischen Lehre über die Harmonie und die mystische Rolle der ganzen Zahlen in der Natur. Ebenso wie die Anhänger dieser Philosophie unter den alten Griechen war Balmer davon überzeugt, daß man dem Geheimnis der Einheit aller beobachteten Erscheinungen durch verschiedene Kombinationen ganzer Zahlen auf die Spur kommen könne. Als seine Aufmerksamkeit daher von einer Gruppe klar abgegrenzter Spektrallinien angezogen wurde, ging er bereits mit einer fest umrissenen Auffassung an diese Naturerscheinung heran. Seine Erwartungen bestätigten sich: Es zeigte sich, daß die Wellenlängen, die den verschiedenen Spektrallinien im sichtbaren Bereich des Wasserstoffatoms entsprechen, durch einfache ganzzahlige Beziehungen miteinander verbunden sind.

Mit Balmers Entdeckung beginnt eine neue Epoche in der Atomphysik. Im Grunde genommen beginnt mit dieser Formel die gesamte Atomtheorie. Damals wußte man dies zwar noch nicht, fühlte es aber wahrscheinlich bereits unbewußt. Schon 1886 bemerkte Runge, daß die Balmersche Formel »durchsichtiger« wird, wenn man in ihr statt der

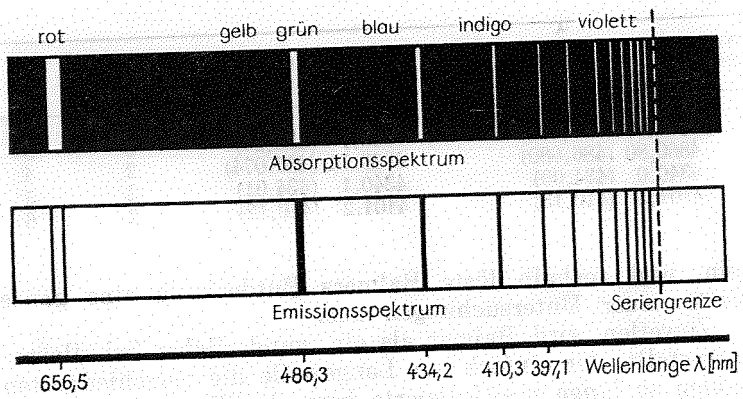

Abb. 8. Absorptions- und Emissionsspektrum des Wasserstoffs (Balmer-Serie)

Wellenlänge λ die Frequenz $\nu = \frac{c}{\lambda}$ einsetzt. Dann ergibt sich nämlich:

$$\nu = \frac{c}{b}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right).$$

Im Jahre 1890 schließlich schlug der schwedische Physiker Johann Robert Rydberg (1854—1919) jene Schreibweise für Balmers Formel vor, die bis heute beibehalten worden ist:

$$\nu = cR\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right).$$

Hierin ist c die Lichtgeschwindigkeit, n und k sind die uns bereits bekannten beliebigen ganzen Zahlen, und die Zahl $R = 109\,677,576\ \mathrm{cm}^{-1}$ heißt seitdem die Rydberg-Konstante für das Wasserstoffatom. Setzt man in dieser Formel $n=2$, dann kann man die gesamte Balmerserie berechnen, die in der Folgezeit bis zu $k=31$ gemessen worden ist.

Damals entstand auch der Gedanke, die Frequenz ν als Differenz zweier Zahlenausdrücke T_n und T_k, die man auch Terme nennt, zu schreiben:

$$\nu = \frac{cR}{n^2} - \frac{cR}{k^2} = T_n - T_k.$$

Auf den ersten Blick lassen sich keine besonderen Vorzüge dieser Schreibweise erkennen. Im Jahre 1908 jedoch

erläuterte der Schweizer Physiker Walter Ritz (1878—1909) den tieferen Sinn der Darstellung. In Fortsetzung der Arbeiten Rydbergs formulierte er das sogenannte Kombinationsprinzip: Die Frequenz ν einer beliebigen Linie im Spektrum eines Atoms läßt sich als Differenz der beiden Terme T_n und T_k darstellen:

$$\nu_{nk} = T_n - T_k ,$$

und zwar selbst dann, wenn sich der einzelne Term T_n bereits nicht mehr in so einfacher Form aufschreiben läßt wie für das Wasserstoffatom.

Zunächst scheint hierin keinerlei Gewinn zu liegen: Wir sind einfach von den einzelnen Frequenzen einer Serie zu den entsprechenden Differenzen von zwei Termen übergegangen. So verhält es sich allerdings nicht. Versuchen Sie einmal, ein Buch zu lesen, das keine Zwischenräume zwischen den Wörtern hat. Sie werden den Unterschied zu den »normalen Büchern« sofort begreifen! Ähnlich ist die Situation in unserem Fall. Außerdem sind es jetzt wesentlich weniger Zahlen: Um die Frequenzen der fünfzig Linien des Wasserstoffatoms zu ermitteln, die man zu Anfang des Jahrhunderts kannte, genügte es, ein Dutzend Terme zu wissen.

Unerwartet war im Zahlenchaos ein System entdeckt worden. Die willkürliche Anordnung der Linien eines Elements zerfiel in einzelne Serien. In dem bis dahin unverständlichen Buch begannen einzelne Worte erkennbar zu werden. Im einfachsten Falle, beim Wasserstoffatom, gelang es sogar, die Buchstaben zu unterscheiden, aus denen die Wörter zusammengesetzt sind. Doch der Sinn der Wörter und die Herkunft der Buchstaben blieben nach wie vor unbekannt: Die »Hieroglyphen« hatten noch nicht zu sprechen begonnen. Aber sie erschienen jetzt weniger geheimnisvoll.

Das Bestreben, die Struktur des Spektrums zu erfassen, erinnert an den Versuch, einen unbekannten Text nahezu blindlings dechiffrieren zu wollen. Diese ermüdende Arbeit dauerte länger als ein Vierteljahrhundert, und das Fehlen einer umfassenden Idee ließ viele bedeutende Wissenschaftler vor diesem Problem zurückschrecken. Es mußte erst der Schlüssel für die Chiffre gefunden werden. Dies vollbrachte der Däne Niels Bohr (1885—1962) im Jahre 1913.

Winzig — aber wirkungsvoll

Die Strahlung entsteht zwar im Innern des Atoms, besteht jedoch unabhängig von diesem fort, sobald sie es verlassen hat. Gelegentlich besteht Strahlung nur aus Wellen gleicher Länge; solche Strahlung bezeichnet man als monochromatisch. Das Linienspektrum des Atoms setzt sich aus einer Auswahl monochromatischer Strahlen zusammen, und diese ist für die verschiedenen Atome unterschiedlich.

Bisher hat uns meist nur ein Charakteristikum der Wellen, nämlich ihre Frequenz ν interessiert. Doch die Eigenschaften der Strahlen lassen sich nicht allein auf die Strahlungsfrequenz reduzieren. Der Sonnenstrahl ist zwar durchsichtig, aber dennoch kommt ihm eine bestimmte Masse zu. In jeder Minute fallen $2 \cdot 10^{-15}$ g Licht auf jeden Quadratzentimeter der beleuchteten Erdoberfläche. Auf den ersten Blick scheint dies verschwindend wenig zu sein, und doch fallen jährlich 80 000 t Sonnenstrahlen auf unseren Planeten. Diese »Strahlungstonnen« bewirken der Stoffkreislauf in der Natur, so daß alles Leben auf der Erde im Endeffekt nur dank der Sonne möglich ist.

Nach den Arbeiten von Christian Huygens (1629—1695) und Augustin Jean Fresnel (1788—1827) läßt sich die Strahlungswirkung am einfachsten mit den Meereswellen vergleichen, die auf den Strand auflaufen. Jedes Jahr brachte hierfür neue Beweise in Gestalt der Interferenz- und Beugungserscheinungen des Lichtes. Im Jahre 1873 sagte James Clerk Maxwell (1831—1879) auf Grund theoretischer Überlegungen voraus, daß das auf die Oberfläche von Körpern fallende Licht einen Druck auf diese Körper ausüben müsse.

Der Lichtdruck ist ein sehr geringfügiger Effekt, doch Pjotr Nikolajewitsch Lebedew (1866—1912) gelang es 1899, ihn experimentell nachzuweisen. Es schien, als sei die Wellennatur des Lichtes nun endgültig gesichert.

Glücklicherweise werden in der Physik Versuche nicht nur zur Prüfung von Theorien angestellt. Zu der Zeit, in der Lebedew sein berühmtes Experiment vollzog, entdeckte Heinrich Hertz (1857—1894) — jener Forscher, der die Wellennatur der elektromagnetischen Strahlung nachwies und damit zugleich die Gültigkeit der gesamten Maxwellschen Elektrodynamik — eine Erscheinung, die später die Bezeichnung **Photoeffekt** erhielt. Das Wesen dieses Effekts besteht in folgendem:

Richtet man das Licht einer Quecksilberdampflampe — heute benutzen wir Quarzlampen — auf metallisches Natrium, dann beginnen aus seiner Oberfläche Elektronen auszutreten und davonzufliegen.

Am Ende des vorigen Jahrhunderts war einem großen Teil der Physiker bereits klar, daß das Atom eine komplizierte Struktur besitzt, und darum setzte dieser Effekt niemand in Erstaunen. Verhältnismäßig rasch schloß man sich der Auffassung an, daß die Elektronen im Hertzschen Versuch unter dem Einfluß der Strahlung der Lampe aus den Atomen herausgelöst werden.

Merkwürdig und unverständlich war etwas anderes: die Gesetze dieser Erscheinung. Sie wurden an der Schwelle zum 20. Jahrhundert von Philipp Lenard (1862—1947) und Alexander Grigorjewitsch Stoletow (1839—1896) entdeckt. Diese beiden Wissenschaftler ermittelten die Anzahl der ausgelösten Elektronen und deren Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Intensität und Frequenz der einfallenden Strahlung.

Wir wissen bereits, daß sich ihm Innern der Atome entstehende Strahlen voneinander nicht allein durch ihre Wellenlänge λ — oder, was dasselbe bedeutet, durch ihre Frequenz ν — voneinander unterscheiden, sondern auch in ihrer Intensität. Dies geht aus den Spektrogrammen eindeutig hervor: Einige Linien sind dort beträchtlich heller als andere; beispielsweise ist die Linie D_2 in der gelben Doppellinie des Natriums zweimal so hell wie die Linie D_1.

Aus allem, was wir bisher über Wellen wissen, folgt nun, daß sich eine Welle um so stärker bemerkbar macht, je größer ihre Amplitude ist. (Um sich davon zu überzeugen, braucht man nur einmal während eines Sturms an den Meeresstrand zu gehen.) Durch Vergrößerung der Amplitude erhöhen wir also die Intensität der Strahlen. Die Intensität der Strahlung läßt sich aber auch erhöhen, indem man die Zahl der strahlenden Atome vergrößert. Verwendet man statt einer Quecksilberdampf- oder Quarzlampe zwei, drei oder zehn, dann steigt die Strahlungsintensität entsprechend. Man sollte nun erwarten, daß die Energie der herausfliegenden Elektronen im gleichen Verhältnis zunimmt. Doch die Energie der Elektronen bleibt stets unverändert, nur ihre Anzahl ändert sich.

Das war die erste Ungereimtheit, die die Wissenschaftler am Ende ihrer Versuche feststellten. Die Energie hing

in starkem Maße von der Frequenz und nicht von der Intensität der einfallenden Strahlung ab.

Eine Quarzlampe strahlt violettes und ultraviolettes Licht aus. Richtet man jedoch rotes Licht auf die Natriumoberfläche, dann werden keine Elektronen herausgelöst, so viele Lampen wir auch immer verwenden.

»Wenn die Strahlung ein Wellenprozeß ist (und dies gilt als bewiesen), dann kann das nicht sein«, behaupteten die einen.

»Aber es geschieht doch!« entgegneten die anderen.

Wenn Felsklippen am Meer vor unseren Augen plötzlich und unerwartet zusammenbrechen, dann würden wir wahrscheinlich die äußeren Ursachen für eine derartige Katastrophe nicht sofort erkennen. Gewiß, die Wellen waschen ständig die Felsen aus, und von Zeit zu Zeit stürzen Felsklippen ein; aber wir wissen, wie selten das geschieht. Wenn jedoch ein Kriegsschiff mit seinem schwersten Geschütz vom Meer aus auf die Küste feuert, wäre uns klar, daß die Ursache der plötzlichen Zerstörungen nicht die Wellen, sondern die Artilleriegeschosse sind, obwohl ihre Energie geringer ist als die Gesamtenergie der Meereswellen. Die Energie der Wellen verteilt sich gleichmäßig auf die gesamte Küstenlinie, und es vergehen Jahrhunderte, ehe man das Ergebnis ihrer unaufhörlichen Tätigkeit sieht. Im Vergleich zu der Energie der Meereswellen ist die des Geschosses verschwindend gering. Dafür aber ist sie auf ein kleines Volumen konzentriert, und sie wird augenblicklich freigesetzt. Ist ein Geschoß hinreichend groß, dann kann es eine Klippe zerstören. Dieser letzte Umstand ist wichtig: Ein Artilleriegeschoß hat, abgesehen von seiner Größe, genau die gleichen Eigenschaften wie eine Gewehrkugel, nur vermag eine Gewehrkugel niemals einen großen Felsblock zu zerstören.

Von etwa dieser Überlegung ging Albert Einstein (1879 bis 1955) aus, als er seine Erklärung des Photoeffekts vorlegte. Er war der erste, der Plancks Hypothese nicht nur akzeptierte, sondern sie auch zur Erklärung der neuen Versuche verwendete. Einstein behauptete: Das Licht wird nicht nur als Quanten ausgesandt, wie dies Plancks Hypothese forderte, sondern es breitet sich auch in Form von Quanten aus. Deshalb kann man auf die Oberfläche eines Metalls fallendes Licht nicht mehr mit Meereswellen vergleichen, sondern mit Artilleriegeschossen. Dabei vermag

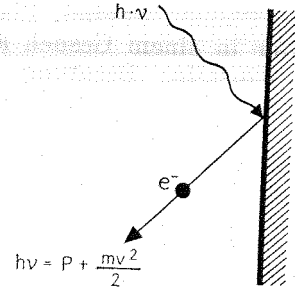

Abb. 9. Photoeffekt

jedes »Quantengeschoß« immer nur ein Elektron aus einem Atom herauszulösen.

Nach Planck ist die Energie eines Quants $E=h\cdot\nu$. Ein bestimmter Teil dieser Energie — wir wollen ihn mit P bezeichnen — wird dafür verbraucht, das Elektron vom Atom zu trennen. Der übrige Teil dagegen dient zur Beschleunigung des Elektrons auf die Geschwindigkeit v, d.h. dazu, dem Elektron die kinetische Energie $\frac{mv^2}{2}$ zu erteilen. Beide Aussagen lassen sich mit Hilfe folgender Gleichung niederschreiben:

$$h\nu = P + \frac{mv^2}{2}.$$

Diese einfache Hypothese reicht aus, um den Photoeffekt zu erklären. Solange die Größe der Quanten klein ist (rotes Licht), sind sie außerstande, ein Elektron aus dem Atom herauszuschlagen ($h\nu < P$), wie viele »Geschosse« wir auch immer auf das Metall »abfeuern«. Wenn wir nun die Energie der Quanten vergrößern (violettes Licht), dann reicht sie schließlich für das Herauslösen der Elektronen aus ($h\nu > P$). Doch nach wie vor hängt die Energie der «Quantengeschosse« nur von der Frequenz ν und nicht von der Anzahl der Quanten ab.

Sechzehn Jahre nach der Veröffentlichung dieser Formel würdigt die Schwedische Akademie der Wissenschaften die tiefe Einsicht dieser so einfachen Einsteinschen Gleichung mit dem Nobelpreis.

Im Jahre 1905 allerdings, als diese Gleichung zum ersten Male veröffentlicht wurde, erregte sie bei vielen Wissen-

schaftlern, selbst bei Planck, Zweifel. Planck schätzte Einstein sehr, und als er in einem Gesuch an das Preußische Kultusministerium Einsteins Berufung nach Berlin vorschlug, bat er ausdrücklich darum, ihm seine Hypothese bezüglich des Photoeffekts »... nicht allzu sehr anzulasten«.

Man kann Planck verstehen: Entgegen den allgemeingültigen Traditionen und auch entgegen seinem eigenen Wunsch hatte er das Wirkungsquantum h in die Physik eingeführt. Doch nur allmählich wurde er sich der Unvermeidlichkeit dieses Schrittes bewußt. Noch 1909 gestand er Einstein: »Ich glaube noch immer nicht so recht an die Realität der Lichtquanten.« Aber es war nun einmal geschehen: »Planck hat den Physikern einen Floh ins Ohr gesetzt«, sagte Einstein zwanzig Jahre später, und dieser Floh gab ihnen keine Ruhe, so sehr sie sich auch anstrengten, ihn zu ignorieren. Planck jedenfalls hatte sich bemüht, das Wirkungsquant so in die Physik einzuführen, daß die Wellenoptik — ein Gebäude von ungewöhnlicher Schönheit, das in zwei Jahrhunderten errichtet worden war — nicht in Mitleidenschaft gezogen wurde. Deshalb sollte nach Planck auch nur die Emission des Lichtes in Form von Quanten erfolgen, seine Ausbreitung dagegen sollte sich nach wie vor in Wellenform vollziehen. Nur in diesem Fall war es möglich, alle Resultate der Wellenoptik zu erhalten.

Einstein dagegen verfuhr so, als hatte es vor ihm die Physik überhaupt nicht gegeben, als sei ihm die wahre Natur des Lichtes unbekannt. Hier zeigte sich eine bemerkenswerte Eigentümlichkeit Einsteins: Er vertraute seiner Intuition und den Tatsachen mehr als der Logik, obwohl er diese mit aller Vollkommenheit beherrschte. Für ihn gab es keine zufälligen Tatsachen in der Physik. Deshalb sah er im Photoeffekt auch nicht eine ärgerliche Ausnahme von den Regeln der Wellenoptik, sondern vielmehr ein Signal der Natur für die Existenz noch unbekannter, aber weitreichender Gesetzmäßigkeiten.

So war es geschehen, daß zuerst die Welleneigenschaften des Lichtes erforscht wurden. Erst bei den Erscheinungen des Photoeffekts stießen die Physiker auf die Teilcheneigenschaften des Lichts. Doch die meisten damaligen Physiker wollten einfach nicht daran glauben, weil sie mit der überkommenen Denkweise der damals noch herrschenden positivistischen Philosophie nicht das dialektische Wechselspiel der Naturprozesse zu begreifen vermochten.

Selbstverständlich kannte auch Einstein die ganze Geschichte der Optik ebenso gut wie die anderen. Doch er beugte sich nicht den in der damaligen Physik geltenden Autoritäten. Alle früheren Verdienste der Optik hatten für Einstein keinerlei Bedeutung, wenn sie nicht imstande waren, auch nur ein einziges, dafür aber unbestreitbares Experiment zu erklären. Einstein glaubte zutiefst an die Einheit der Natur. Sein Gewissen erlaubte es ihm nicht, stillschweigend an einer »unerwünschten« Tatsache vorüberzugehen.

Eine echte Gefahr in der Wissenschaft sind Experimente mit falschen Ergebnissen, weil man Versuchsergebnissen gewöhnlich Glauben schenkt. Doch jede Hypothese, wie anziehend sie auch immer erscheinen möge, wird stets sorgfältig überprüft. Auch wenn sie sich am Ende als falsch herausstellt, erbringen gerade die Experimente, die dies beweisen, häufig wertvollere Ergebnisse als die Hypothese selbst. Auch Einsteins Hypothese wurde überprüft, und sie erwies sich als wahr.

Im Jahre 1911 bestimmte Robert Millikan bei der Überprüfung der Einsteinschen Gleichung den Wert des Planckschen Wirkungsquantums h. Es stimmte mit dem Wert überein, den Planck aus der Theorie der Wärmestrahlung erhalten hatte. Bald darauf wurde ein Versuch unternommen, dessen Grundgedanke unserem Bild vom Einsturz der Felsklippen am Meeresufer analog ist. Und wieder behielt Einstein recht und nicht die anerkannte Autorität der Wellenoptik.

Selbstverständlich bestritt Einstein nicht die Wellenoptik. Ebensowenig zweifelte er an jenen Versuchen, die die Wellennatur des Lichtes bewiesen. Er hatte den entstandenen Widerspruch einfach konsequent durchdacht und seine Lösung der nächsten Physikergeneration überlassen. Mehr noch: Schon 1909 sagte er bei einem Vortrag auf der 81. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher in Salzburg voraus, daß die nächste Entwicklungsphase der theoretischen Physik eine Lichttheorie bringen würde, die in gewissem Sinne eine Verschmelzung der Wellentheorie des Lichtes mit der Strömungstheorie darstellte. Zwanzig Jahre später traf seine Vorhersage ein.

Entgegen allen Einwänden ging die Idee des Quants nicht unter, sondern führte wenige Jahre später zu Ergebnissen von großer Tragweite. Dies geschah im Jahre 1913, als der Däne Niels Bohr in Rutherfords Laboratorium zu arbeiten anfing.

Der endgültige Sieg der Atomistik

Am 20. Mai 1904 wurde in Manchester, wo John Dalton (1766—1844) den Höhepunkt seiner wissenschaftlichen Laufbahn erlebt hatte, der 100. Jahrestag der Begründung der Atomtheorie mit jener Feierlichkeit begangen, zu der sich die Engländer aus ihrer Tradition heraus verpflichtet fühlten. Der Sieg der Atomtheorie hatte sich nicht sogleich eingestellt: Selbst nach den Arbeiten Daltons sahen viele die Atomistik noch lange Zeit als eine interessante Hypothese an, die unter dem Aspekt unserer Erkenntnisfähigkeit durchaus zulässig ist.

Die Einmütigkeit, mit der fast alle Philosophen des vorigen Jahrhunderts die Existenz der Atome negierten — eine Ausnahme war z.B. Friedrich Engels (1820—1895) —, hatte auch den Glauben der Physiker an ihre Realität erschüttert. Der Philosoph und Physiker Ernst Mach (1838 bis 1916), mit dessen reaktionärer, positivistischer Lehre sich 1909 Lenin in »Materialismus und Empiriokritizismus« auseinandersetzte, bezeichnete alle Atomisten als eine »Gemeinde von Gläubigen«, und er unterbrach jeden, der ihn überzeugen wollte, mit der Frage: »Haben's denn wenigstens eines gesehen?«. Erst 1910, als er Szintillationen von Alphateilchen erblickt hatte, gab er seinen Widerstand gegen die Atomtheorie auf.

Trotz aller Widerstände hatte die Idee vom Atom zu Beginn unseres Jahrhunderts endgültig gesiegt: Der Verstand des Menschen vermochte selbst Dinge zu begreifen, die man sich nicht vorstellen kann. So kam der Sieg der Atomtheorie doch nicht erst 300 Jahre später, wie Ludwig Boltzmann (1844—1906) gemeint hatte.

Der Sieg kam viel früher und doch zu spät: Der Begriff »Atom« hatte nach den Arbeiten von J. J. Thomson und E. Rutherford seinen früheren Sinn bereits verloren. Zu dieser Zeit war bereits klar, daß das Atom nicht das einfachste Teilchen einer Substanz ist, obwohl es sich mit den Mitteln der Chemie nicht weiter zerlegen läßt. »Die Naturgesetze werden leider immer erst dann ganz verständlich, wenn sie schon nicht mehr stimmen«, pflegte Einstein zu sagen. Dies bedeutet jedoch nicht, daß die Gesetze damit ihre Bedeutung völlig verlieren. Der Nachweis der Realität des Atoms wird in der Geschichte der Atomistik immer einer ihrer wichtigsten Siege bleiben.

Der endgültige Triumph der Atomistik ist ebenfalls mit Einsteins Namen verbunden. Im Jahre 1905, in jenem Jahr, in dem er den Photoeffekt erklärte, gab er eine mathematische Beschreibung der Brownschen Bewegung. Zur gleichen Zeit fand auch der polnische Physiker Marian von Smoluchowski (1872—1917) diese Beziehungen. Die experimentelle Bestätigung dieser Theorie lieferte Jean Perrin (1870—1942), der 1909 auf einen Rat Langevins systematische und sorgfältige Untersuchungen der Brownschen Bewegung vornahm. Bereits vor Perrin waren viele Physiker davon überzeugt, daß der wahre Grund für diese Bewegungen in Stößen der Flüssigkeitsmoleküle zu suchen ist, die selbst im besten Mikroskop nicht zu sehen sind. Doch die verblüffenden Experimente Perrins bewiesen nicht schlechthin die Richtigkeit dieser Auffassung, sondern führten auch zu einem weit bedeutsameren Ergebnis. Die unverständliche Bewegung von Teilchen in einer Flüssigkeit stellt ein genaues Modell der wahren Bewegung der Moleküle dar, nur um das Mehrtausendfache vergrößert. So erhalten wir durch das Studium der Brownschen Bewegung von Teilchen ein anschauliches Bild von der Bewegung der unsichtbaren Moleküle. Genauso vermittelt uns die Kenntnis der Eigenschaften von Radiowellen eine Vorstellung von den Lichtwellen und sogar von den Röntgenstrahlen.

Nach diesen Arbeiten wurde die Atomhypothese allgemein anerkannt. Noch im Jahre 1909 erbrachte Rutherford zusammen mit T. D. Royds (geb. 1884) den überzeugendsten Beweis für die atomare Struktur der Materie. Das alles trug sich folgendermaßen zu:

Schon seit langem war bemerkt worden, daß sich in Mineralien, die radioaktive Stoffe wie Thorium, Uran oder Radium enthalten, Helium ansammelt. Es wurde sogar ermittelt, daß sich aus 1 g Radium im Zustand des radioaktiven Gleichgewichtes an einem Tag 0,46 mm^3 Helium herauslösen, d.h. $5{,}32 \cdot 10^{-9}$ cm^3/s. Seitdem die Natur der Alphateilchen bekannt war, gab es an diesem Fakt nichts Verwunderliches. Doch Rutherford blieb dabei nicht stehen. Er zählte die Alphateilchen, die je Sekunde von 1 g Radium ausgestrahlt wurden. Diese Zahl erwies sich als groß, aber völlig bestimmbar: $13{,}6 \cdot 10^{10}$ Teilchen/g·s. Alle diese Alphateilchen wandeln sich in Heliumatome um, indem sie zwei Elektronen einfangen, und nehmen

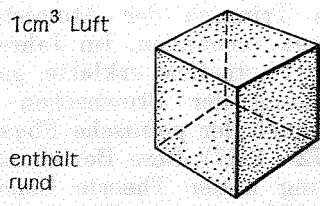

Abb. 10. Die Loschmidtsche Zahl

das Volumen $5{,}32 \cdot 10^{-9}$ cm³ ein. Folglich enthält 1 cm³

$$L = \frac{13{,}6 \cdot 10^{10}}{5{,}3 \cdot 10^{-9}} = 2{,}56 \cdot 10^{19} \text{ Atome.}$$

Das ist aber nichts anderes als die Loschmidtsche Zahl, die Loschmidt auf der Grundlage der molekularkinetischen Hypothese ausgerechnet hatte. Tatsächlich, 1 Grammatom Helium (wie auch das eines beliebigen Gases) nimmt ein Volumen von 22,4 l bei Normaldruck ein und enthält $6{,}02 \cdot 10^{23}$ Atome, d.h., in 1 cm³ gibt es

$$L = \frac{6{,}02 \cdot 10^{23}}{22{,}4 \cdot 10^{3}} = 2{,}69 \cdot 10^{19} \text{ Atome.}$$

Die Übereinstimmung ist überzeugend.

Ehe der Mensch aber irgend etwas endgültig anerkennt, will er dieses »Etwas« mit eigenen Augen gesehen haben. (Dafür gibt es jedoch streng genommen keinerlei Gründe: Schließlich fallen wir oft genug optischen Täuschungen zum Opfer.) Es war Charles Thomson Rees Wilson (1869—1959), dem es im Jahre 1911 nach fünfzehnjähriger angestrengter Arbeit gelang, mit seiner berühmten Kammer Atome sichtbar zu machen. Dieses Gerät gestattet es, die Bewegung einzelner Alphateilchen an ihren Nebelspuren zu verfolgen, die sie in der Kammer hervorrufen.

Natürlich bestand die Bedeutung dieser Erfindung nicht darin, daß sie eine Laune der menschlichen Psyche befriedigte, sondern darin, daß die Physiker jetzt ein neues Instrument zur Erforschung der Struktur des Atoms in den Händen hielten.

Im Jahre 1912 gab es bereits 13 Verfahren zur Bestimmung der Avogadroschen Zahl N, und von ihrem genauen Wert hing die Erklärung einer Vielzahl von Erscheinungen

ab, die auf den ersten Blick nichts miteinander zu tun hatten: die Brownsche Bewegung, die blaue Farbe des Himmels, die Viskosität der Gase, das Spektrum des schwarzen Körpers, die Radioaktivität und die Gesetze der Elektrolyse. Die Zahl N war sehr groß, aber nicht unendlich groß. Wir haben hier bei weitem nicht alle Versuche angeführt, die letztlich ausnahmslos alle Physiker davon überzeugt hatten, daß die Zahl N der Atome in einem Grammatom jedes beliebigen Stoffes zwar sehr groß, aber endlich ist. Ebenso wie die Anzahl von Menschen auf der Erde kann diese Zahl N keine gebrochene Zahl sein. Mehr noch: Die Avogadrosche Zahl $N = 6{,}02497 \cdot 10^{23}$ kennen wir heute bedeutend genauer als die Anzahl der Erdbewohner.

»Wenn durch irgendeine Weltkatastrophe plötzlich alle bislang erworbenen wissenschaftlichen Kenntnisse vernichtet würden und den künftigen Generationen lebender Wesen nur ein einziger Satz überliefert werden könnte, welche Aussage, bestehend aus der kleinstmöglichen Anzahl von Wörtern, übermittelte ihnen dann die maximale Information? Ich denke, daß es die Atomhypothese ist...: Alle Körper bestehen aus Atomen, kleinen Körpern, die sich in ständiger Bewegung befinden und sich bei kleinem Abstand gegenseitig anziehen, aber abstoßen, wenn eines zu dicht an das andere gepreßt wird.

In diesem einen Satz ist eine unwahrscheinliche Informationsmenge über die Welt enthalten, wenn man nur ein wenig Vorstellungskraft und etwas Verstand darauf verwendet.«

Diese Worte stammen von Richard P. Feynman, dem Nobelpreisträger für Physik des Jahres 1965. Und obwohl dies eine fast wörtliche Wiederholung Demokrits ist, sind doch die Begriffe und Vorstellungen, die wir heute mit diesen Worten verknüpfen, gänzlich andere: In 25 Jahrhunderten haben wir viel Neues über das Atom erfahren.

Rund um das Quant

Das unteilbare Atom

Auf dem Stand unseres heutigen Wissens haben wir die alten Argumente zugunsten der Existenz des Atoms vergessen; heute sind sie lediglich von historischem Interesse.

Trotzdem wollen wir einige von ihnen nicht unerwähnt lassen.

Die Anhänger des Atoms stellen ihren Gegnern vor allem folgende Frage: »Wie kann die gleiche Menge Stoff, wenn dieser nicht aus Atomen aufgebaut sein soll, unterschiedliche Volumina einnehmen, wie wir dies etwa bei der Kontraktion und Expansion von Gasen beobachten?« Weiter folgten dann Beweise für die geringe Größe der Atome und ihre ungeheuer große Zahl, so etwa: Eine winzige Kristallnadel des Farbstoffs Indigo vermag eine Tonne Wasser anzufärben. Es wurde z. B. auch berichtet, daß ein Gran (0,062 g) Moschus zwanzig Jahre lang ein großes Zimmer mit seinem Geruch erfüllte und dabei keine sichtbaren Veränderungen erfuhr.

Mit der Entwicklung der Naturwissenschaften schwand das blinde Vertrauen auf — selbst vertrauenswürdig erscheinende — Gedankenkombinationen: An ihre Stelle trat die quantitative Beurteilung.

Schon Newton hatte die Wanddicke von Seifenblasen abgeschätzt und nachgewiesen, daß diese nur ein Fünfzigstel der Wellenlänge des Lichtes, nämlich 10^{-6} cm=10 nm betragen muß. Nach Newton befaßten sich noch viele Wissenschaftler (u.a. auch Lord Kelvin) wiederholt mit der Untersuchung von Seifenblasen.

Seit Benjamin Franklin einen Löffel Öl auf die Oberfläche eines Teiches gegossen hatte, wiederholte man seinen Versuch in den unterschiedlichsten Varianten. Rayleigh insbesondere gelang die Darstellung von Ölfilmen mit nur 1,6 nm Dicke, und Röntgen konnte diese noch auf 0,5 nm reduzieren, was dem Fünffachen des Wasserstoffatomdurchmessers entspricht.

Faraday fertigte Goldplättchen von 10^{-6} cm Dicke an und gelange durch Ausfällen einer Goldfolie auf Glas zu einer Dicke, die einem Zehntel der Wanddicke von Seifenblasen entspricht. Solche Goldfolien sind durchsichtig, und ihre Dicke entspricht dem Zehnfachen des Atomdurchmessers.

Unter allen übrigen Versuchen zur Ermittlung der Atomgröße sei hier an die zu Unrecht vergessenen Arbeiten von Thomas Young (1773—1829) erinnert, der 1805 bei Untersuchungen über Kapillarerscheinungen sowie der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten zu dem Schluß kam, daß die Größe der Atome höchstens 10^{-8} cm beträgt.

Die Atome und die Leere

Es fällt sehr schwer, sich vorzustellen, daß das Atom eine ungewöhnliche Stabilität besitzt, daß es aber andererseits ebenso leer ist wie der Raum zwischen der Erde und der Sonne.

Bekannt ist beispielsweise, daß Wasser selbst unter einem Druck von 10 000 at doch immer Wasser bleibt. Diesen hohen Druck etwa würde ein Elefant ausüben, wenn es gelänge, ihn auf eine Fläche von 1 cm^2 zu stellen. Es läßt sich leicht berechnen, daß bei einem derartigen Druck auf jedes Atom eine Kraft von ungefähr 10^{-9} p wirkt, eine Kraft also, die das Eigengewicht des Atoms (10^{-23} p) um das 10^{14}fache übersteigt. Die Verhältnisse liegen hier ungefähr so, als wollte man einen Elefanten einige hundert Berge von der Größe des Tschomolungma (Mount Everest) tragen lassen.

Das alles ist erstaunlich, hindert die Atome aber nicht im geringsten daran, leer zu sein. So könnte man alle Atomkerne, aus denen der Tschomolungma besteht, bequem in einen Sack stecken.

Das Beugungsgitter

Fraunhofer benutzte schon 1819 das Beugungsgitter; Ångström machte es zum wichtigsten Instrument seiner Untersuchungen, und Rowland gab ihm schließlich nahezu die Form, in der es heute verwendet wird. Das Wirkungsprinzip des Gitters beruht auf dem Beugungseffekt, d.h. auf der Fähigkeit der Wellen, ein Hindernis zu umgehen, wenn dessen Größe in der Größenordnung ihrer Wellenlänge liegt. Wellen verschiedener Länge umgehen ein Hindernis auf verschiedene Weise, so daß sie voneinander unterschieden und genau vermessen werden können.

Dank dieses Gerätes wurde in der Spektroskopie eine hohe Meßgenauigkeit erreicht. Bereits zu Beginn unseres Jahrhunderts gelang es, zwei Linien im sichtbaren Spektrum voneinander zu trennen, wenn sich ihre Wellenlängen wenigstens um 10^{-13} m voneinander unterschieden (heute hat diese Genauigkeit 10^{-14} m erreicht).

Um die Genauigkeit derartiger Messungen vor Augen zu führen, sei folgender Vergleich gezogen: Wenn bei einer Längenmessung des Äquators die gleiche Genauigkeit er-

reicht werden soll, müßte seine Länge auf einen Meter genau bestimmt werden. Es ist klar, daß für dieses Unterfangen keinerlei Notwendigkeit vorliegt und daß es überdies keinen besonderen Sinn hätte, da das Ergebnis dieser Messung von jedem Ameisenhaufen am Wege abhängen würde In der Spektroskopie hingegen sind Anstrengungen, höchstmögliche Meßgenauigkeiten zu erreichen, nicht von nur »sportlichem« Interesse. Das hat auch die weitere Geschichte des Atoms überzeugend bewiesen — trotz allen Mißtrauens und aller Spötteleien, die diese Bemühungen zuweilen begleiteten. Eine Bestätigung dafür ist die Geschichte des »Urmeters«.

Der berühmte Platin-Iridium-Stab mit seinen beiden Strichmarken, der in Sèvres bei Paris im Internationalen Büro für Maß und Gewicht in einer Glasvitrine aufbewahrt wird, entspricht keineswegs exakt dem vierzigmillionsten Teil des Äquators, wie man ursprünglich angenommen hatte.

Das Mitglied der Französischen Akademie der Wissenschaften Jacques Babinet (1794—1872) war einer der ersten, der Zweifel an der Nützlichkeit eines solchen Eichmaßes äußerte und vorschlug, dafür die Wellenlänge irgendeiner Spektrallinie als einer Größe zu wählen, die absolut unveränderlich ist und selbst von kosmischen Veränderungen nicht abhängt. Sein Vorschlag wurde 1882 von Michelson aufgegriffen. Doch erst im Jahre 1958 wurde ein neues Eichmaß für das Meter gesetzlich festgelegt: 1 Meter ist diejenige Länge, die das 1 650 763,73fache der Wellenlänge der orangefarbenen Linie des Kryptons Kr-86 im Vakuum ausmacht.

Was Rutherford vollbrachte

Zu Beginn unseres Jahrhunderts war der Gedanke, daß der Bau des Atoms dem Planetensystem ähnlich ist, nicht selten. Dieser Gedanke wurde selbst in Lehrbüchern erläutert. Als Beispiel dafür bringen wir einige Auszüge aus dem dritten Band der Elektrizitätslehre, der im Jahre 1908 von G. Pell, Professor an der Universität Paris, herausgegeben wurde:

»... Das Atom ist nicht das unteilbare Teilchen der Materie. Die Ausstrahlung von Licht, welches die für jede Atomart charakteristischen Spektrallinien liefert, deutet bereits auf die Verschiedenartigkeit der Atome hin. Man könnte annehmen, daß das Atom aus einer sehr großen Zahl

von Korpuskeln besteht, die von irgendeinem Zentrum angezogen werden wie die Planeten von der Sonne.

Damit das Atom elektrisch neutral ist, muß die positive elektrische Ladung, die sich, wie wir annehmen, im Zentrum des Atoms befindet, ihrer absoluten Größe nach gleich der Summe der negativen Ladung der Korpuskeln sein, die um sie kreisen.

Mit einem Wort, alle Licht- und Wärmeerscheinungen sowie alle elektrischen und mechanischen Erscheinungen lassen sich erklären, setzt man die Existenz zweier verschiedener Materien voraus: von Korpuskeln — oder negativen Elektronen — und von positiven Elektronen, über die wir fast nichts wissen. Die zentrale positive Ladung besteht aus positiven Elektronen, deren Anzahl sich in Abhängigkeit von der Atomsorte ändert, für jede Art von Atomen hingegen vollständig definiert ist...

Es wäre überflüssig, die Schönheit dieser Theorie beweisen zu wollen, die uns die Möglichkeit gibt, alle bis jetzt bekannten Erscheinungen zu erklären, und die es gestattet, so viele Erscheinungen und Gesetze miteinander zu verbinden, die, wie es zunächst schien, nichts miteinander zu tun hatten.«

Ein Jahr später schrieb der berühmte französische Physiker und Mathematiker Henri Poincaré (1854—1912) nicht weniger eindeutig: »Alle Versuche zur Leitfähigkeit von Gasen ... geben uns Grund zu der Annahme, das Atom bestehe aus einem positiv geladenen Zentrum, dessen Masse näherungsweise der gesamten Masse des Atoms entspricht, um welches die Elektronen rotieren und von welchem sie angezogen werden«.

Nach diesen Zitaten mögen manche enttäuscht meinen, Rutherford habe eigentlich nichts Neues erdacht. Dieser Irrtum rührt aus dem Unverständnis für die Unterschiede zwischen Naturwissenschaft und spekulativer Naturphilosophie. In der Wissenschaft gilt eine strenge Regel: Entdekker ist, wer den Beweis geliefert hat. Aber in der Naturwissenschaft läßt sich ein Beweis immer nur mit Hilfe von Versuchen und Zahlen führen.

Alle Aussagen vor Rutherford stützten sich auf reine Spekulationen. Erst Rutherford konnte sagen: »So muß es sein. Ich kann es mit Zahlen belegen. Und wer immer das wünscht, kann diese Zahlen überprüfen, indem er meine Versuche wiederholt.«

»Sagen kannst du natürlich alles, aber geh' erst einmal hin und beweise es«, pflegte Dmitri Iwanowitsch Mendelejew (1834—1907) zu sagen. Genau diesen Unterschied zwischen einer verschwommenen Idee und einem wissenschaftlichen Beweis muß man stets im Auge behalten, wenn man etwas über die häufigen Prioritätsstreitigkeiten liest, die in der Wissenschaftsgeschichte von Zeit zu Zeit aufflammen. In allen diesen Fällen ist es vernünftig, nicht jene als Schöpfer einer Theorie anzusehen, die sie zum erstenmal ausgesprochen haben, sondern jene, deren Arbeiten tieferer Ursachen oder zufälliger Umstände wegen entscheidenden Einfluß auf die weitere Entwicklung der Wissenschaft ausgeübt haben. Natürlich enthält diese Verfahrensweise ein Element menschlicher Ungerechtigkeit. Doch auch die Geschichte der Physik denkt nicht in moralischen Kategorien: Ihre Aufgabe ist es nicht, Beleidigte zu trösten, sondern die wahren Gründe und Folgen der tatsächlichen Entwicklung festzustellen.

Der Lichtdruck

Die Hypothese über den Lichtdruck entstand bereits zu Johannes Keplers (1571—1630) Zeiten, der sie im Jahre 1619 zur Erklärung von Ursprung und Form der Kometenschweife vorschlug. Über die Größe des Lichtdrucks war nichts bekannt, und — wie stets in solchen Fällen — erzählte man sich wahre Schauermärchen darüber. So stammt aus dem Jahre 1696 beispielsweise der Bericht von Reisenden, nach deren Worten »die Strömung der Donau morgens erheblich langsamer ist, wenn die Strahlen der Sonne ihrer Bewegung entgegenstehen, um nachmittags zuzunehmen, wenn die Sonnenstrahlen die Strömung unterstützen«.

Bis zum Ende des vorigen Jahrhunderts blieben die in großer Zahl vorgenommenen Versuche, den Lichtdruck experimentell nachzuweisen, ohne Erfolg. Die Ursache für das Mißlingen wurde erst nach den theoretischen Arbeiten Maxwells und den erfolgreichen Experimenten Lebedews völlig klar. Es stellte sich heraus, daß der Lichtdruck sehr klein ist. Selbst an einem klaren, wolkenlosen Tag beträgt der Druck der Sonnenstrahlen auf eine Fläche von 1 cm^2 höchstens $0{,}82 \cdot 10^{-10}$ p. Zum Vergleich sei bemerkt, daß ein Mohnkorn einen millionenfach größeren Druck auf 1 cm^2 ausübt.

Die Modelle des Atoms

Dieses Kapitel ist wohl das schwierigste des ganzen Buches. Auf den ersten Blick könnten es manche Leser für unnötigen Ballast halten, weil es so trocken und kompliziert erscheint. Doch ist dieser Ballast mit jenem vergleichbar, den man im Rumpf einer Fregatte verstaut, um ihr Stabilität zu verleihen, und den man über Bord wirft, wenn die Geschwindigkeit erhöht werden muß. Es ist also ein Ballast, der notwendig und nützlich ist. Zu häufig vernachlässigen wir die Gründlichkeit auf Kosten der Schnelligkeit. Solche Sorglosigkeit bleibt nicht ungestraft: Irgendwann kippt die übervolle Schale unseres Wissens um, der Stütze exakter Fakten beraubt, und wir müssen von neuem beginnen.

Dieses Kapitel ist für jeden nachdenklichen Leser verständlich. Doch es erfordert Fertigkeit im logischen Denken. Diese Anstrengungen werden später jedoch durch größere Vollständigkeit und größeren »Umfang« der erworbenen Erkenntnisse belohnt.

Möglicherweise wird dieses Kapitel beim ersten Lesen mehr Fragen aufwerfen als beantworten. Aber das schadet nichts. Dafür gestattet es, wenigstens einen Blick in die »Küche der Physik« zu werfen. Das Wichtigste besteht darin, daß durch solche Ausflüge in die Tiefe neuer Kenntnisse in uns das Gefühl entsteht, daß die gewonnenen Anschauungen sich zu einem geschlossenen Ganzen zusammenfügen.

Vor Bohr

Als Niels Bohr in Rutherfords Laboratorium in Manchester zu arbeiten begann, wußte man bereits so viel über das Atom, daß es oft nicht leicht war, aus der großen Menge der Fakten die wichtigsten herauszufinden.

In unserer Prinzipdarstellung sind nur jene Erscheinungen dargestellt, die sich als wirklich fundamental für das Verständnis der Struktur des Atoms erwiesen haben.

Auf der Grundlage dieser Tatsachen, die sich verhältnismäßig leicht experimentell nachweisen lassen, mußte nun der innere Aufbau des Atoms gefunden werden, eines

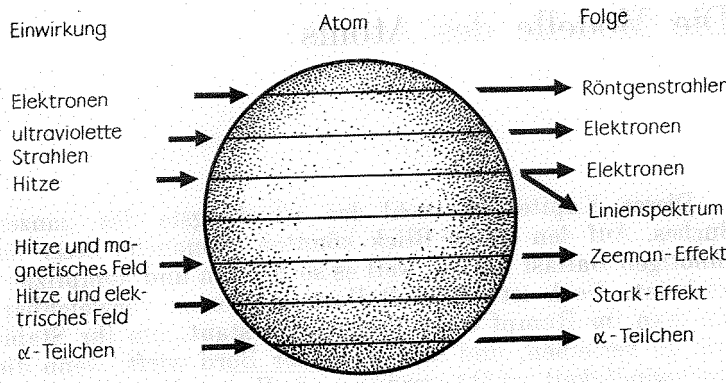

Abb. 11. Einwirkungen auf das Atom

Objektes also, das noch niemand gesehen hat und auch keiner jemals erblicken wird. Solche Probleme nennt man Black-box-Probleme.

Wir kennen den Charakter der Einwirkungen auf die Black box, auf das Atom also, sowie deren Ergebnis, d.h., wir wissen, was vor sich geht und warum dies geschieht. Aber wir wollen ja noch mehr wissen: Uns interessiert, wie diese Prozesse im Atom ablaufen, d.h., wir wollen den Mechanismus der Erscheinungen in der Black box verstehen. Dieses Ziel ist weitaus schwerer zu erreichen, als z.B. die Handlung eines Schauspiels auf der Bühne allein aus Bruchstücken von Musik und Rede herauszufinden. Selbst wenn wir alle äußeren Erscheinungsformen der inneren Eigenschaften des Atoms kennen, bedarf es noch ihrer Verallgemeinerung und Synthese, braucht man jene Intuition, die über Lücken in den logischen Konstruktionen hinweg unfehlbar zum einzig richtigen Bild der Erscheinungen führt.

Aus unserem — natürlich keineswegs vollständigen — Schema geht die ganze Kompliziertheit des Problems hervor. Alle diese sehr unterschiedlichen Versuche müssen unter einem einheitlichen Aspekt (und widerspruchsfrei) erklärt werden.

Niels Bohr fand eine solche Erklärung, als ihm klar wurde, daß die drei physikalischen Vorstellungen »Atom«, »Strahl« und »Elektron« durch den Begriff des Quants miteinander verbunden sind. Bis dahin hatten sie sich unab-

hängig voneinander entwickelt. Die Chemie und die kinetische Theorie der Stoffe hatten die Existenz der Atome bewiesen. Die elektromagnetische Theorie des Lichts von Maxwell beschrieb die Eigenschaften der Strahlen. Die Elektrodynamik von Maxwell und Lorentz versuchte, den Begriff »Elektron« zu erfassen.

Das Wirkungsquant h nahm in Europa selbst nach den Arbeiten Einsteins und Millikans niemand ernst, obwohl es natürlich einzelne Versuche gab, es zur Erklärung physikalischer Prozesse zu verwenden: 1910 probierte Arthur Haas den Einsatz der Planckschen Beziehung $E=h\nu$ zur Bestimmung der Grenze und der Perioden der Elektronenbewegung im Thomsonschen Atommodell; John Nicholson benutzte 1912 die Idee von den Quanten zur Analyse der Spektren der Sonne und der Sternnebel, und Walter Nernst (1864—1941) stellte eine Hypothese über die Quantelung von Drehungen auf.

Die skeptische Einstellung zur Idee von den Quanten brachte am besten Max Planck selbst in einem Vortrag zum Ausdruck, den er am 16. Dezember 1911 vor der Chemischen Gesellschaft hielt. Er sagte, es sei wohl die einfachste, sozusagen naivste Erklärung, der Energie selbst atomistische Struktur zuzuschreiben. Diese Annahme habe er früher selbst gemacht. Doch inzwischen sei er davon abgerückt, weil er sie zu radikal finde. In einem Buch, das er ein Jahr später schrieb, wiederholte er die gleichen Überlegungen: »Wenn man an die vollständige experimentelle Bestätigung denkt, die die Maxwellsche Elektrodynamik in den feinsten Interferenzerscheinungen fand, wenn man an die unwahrscheinlichen Schwierigkeiten denkt, welche der Verzicht auf sie für die gesamte Theorie der elektrischen und magnetischen Erscheinungen zur Folge haben würde, dann empfindet man eine Art Widerwillen, wenn man unverzüglich diese Grundlagen zerstört. Aus diesem Grunde werden wir in den weiteren Darlegungen die Hypothese von den Quanten nicht berücksichtigen, um so mehr, da sich ihre Entwicklung noch in einem rudimentären Zustand befindet.«

Das Bohrsche Atommodell

Im Jahre 1912 arbeitete Niels Bohr bereits in Rutherfords Labor in Manchester. Dort betrachtete man die Quantenhypothese mit einer gewissen Vorsicht, doch mit gerin-

gerem Mißtrauen als auf dem Kontinent. Vielleicht auch war Niels Bohr, als Planck sein oben erwähntes Buch schrieb, schon fest davon überzeugt, daß »die Elektronenstruktur des Rutherfordschen Atoms mit Hilfe des Wirkungsquants gesteuert wird«. Aber es mußte erst noch ein Jahr angestrengter und hartnäckiger Gedankenarbeit verstreichen, ehe Bohr seine berühmten Postulate formulieren konnte.

Welche Überlegungen mußte er dazu anstellen?

Nach den Gesetzen der Mechanik muß das Elektron im Planetenmodell Rutherfords um den Kern rotieren, damit es nicht in diesen hineinstürzt. Nach den Gesetzen der Elektrodynamik muß es dabei Energie abstrahlen und deshalb schließlich doch in den Kern hineinstürzen. Um aus diesem Dilemma herauszukommen, ist es notwendig, dem Elektron zu verbieten, in den Kern zu fallen.

Versuchen wir uns einmal vorzustellen, wie nach dieser Behauptung Bohrs ein Gespräch zwischen den Physikern und ihm verlaufen sein könnte.

»Erlauben Sie«, entgegnete man Bohr, »wie denn das? Einfach verbieten? Wirken zwischen dem Elektron und dem Kern denn nicht elektrische Kräfte?«

»Ja«, antwortete Bohr.

»Werden diese Kräfte nicht durch die Maxwellschen Gleichungen beschrieben?«

»Ja.«

»Und auch die Masse m und die Ladung e des Elektrons wurden aus elektrischen Messungen bestimmt?«

»Ja.«

»Also muß die Bewegung des Elektrons im Atom ebenso den Maxwellschen Gleichungen gehorchen?«

»Nein!«

Sie werden zugeben müssen, daß eine solche Art, eine Diskussion zu führen, selbst einen sehr ruhigen Menschen verärgern muß. »Was wollen Sie denn, das Atom ist doch stabil!« erwiderte Bohr immer wieder auf alle Einwände. »Wir kennen nun einmal keinen einfacheren Grund für diese Stabilität, außer der Tatsache, daß die Stabilität existiert.«

Bei der Suche nach einer vernünftigen Begründung für diesen zweifelsfreien Fakt stieß Bohr auf das Buch »Prinzipien der atomaren Dynamik« von Johannes Stark (1874 bis 1957) und sah dort erstmals die Balmersche und die Rydbergsche Formel.

»Mir wurde plötzlich alles klar«, erinnerte sich Bohr

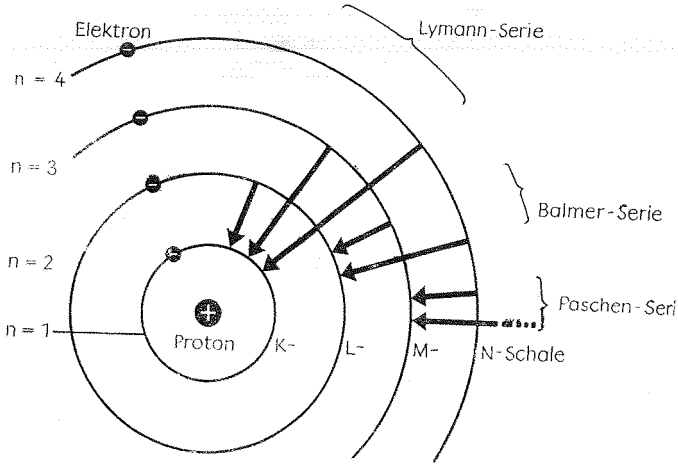

Abb. 12. Das Bohrsche Atommodell

später daran, »und nach den vielen Versuchen, die Vorstellung von den Quanten in strengerer Form zu benutzen, kam mir im Frühjahr 1913 der Gedanke, daß der Schlüssel für die Lösung des Problems der Atomstabilität jene erstaunlich einfachen Gesetze sind, die das optische Spektrum der Elemente bestimmen.«

Nun konnte Bohr seine berühmten Postulate formulieren: 1. Postulat (über die stationären Zustände):
Im Atom existieren Bahnen, auf denen das Elektron kein Licht ausstrahlt. Diese Bahnen heißen stationäre Bahnen.
2. Postulat (über die Quantensprünge):
Eine Ausstrahlung erfolgt nur, wenn das Elektron sprunghaft von einer stationären Bahn auf eine andere stationäre Bahn übergeht, in der es eine kleinere Energie besitzt. Hierbei wird die Frequenz dieser Strahlung von der Einsteinschen Hypothese über die Lichtquanten $\Delta E = h \cdot \nu$ bestimmt, wobei ΔE die Energiedifferenz der Bahnen darstellt, zwischen denen der Sprung vonstatten geht.

Um diese Postulate ein wenig besser zu verstehen, wenden wir uns der offensichtlichen Analogie zwischen der angenommenen Drehung des Elektrons um den Kern und der Drehung eines Sputniks um die Erde zu. Seinerzeit entdeckte Newton das Gravitationsgesetz, als er über die Frage nachdachte: Warum fällt der Mond nicht auf die Erde?

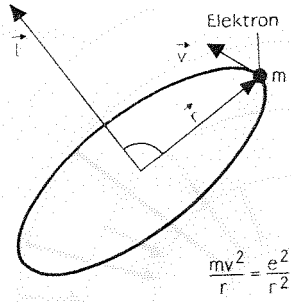

Abb. 13. Zentrifugalkraft gleich elektrische Anziehungskraft

Heute stellt man diese Frage allenfalls noch als Scherzfrage, weil die Antwort allgemein bekannt ist: Weil sich der Mond auf einer ganz bestimmten Bahn bewegt, und zwar mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit, die von seinem Abstand von der Erde abhängt. Damit also ein Satellit weder auf die Erde fällt noch in den Kosmos fliegt, muß zwischen dem Radius r seiner Bahn und der Geschwindigkeit v seiner Bewegung eine bestimmte Beziehung bestehen.

Im Wasserstoffatom existiert bei der Bewegung des Elektrons mit der Masse m und der Ladung e um den Atomkern zwischen der Geschwindigkeit des Elektrons v auf der Bahn und dem Radius r der Bahn eine analoge Beziehung, die man in folgender Form aufschreiben kann:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}.$$

Diese Gleichung ist immer richtig, unabhängig davon, ob das Elektron Licht ausstrahlt oder nicht. Sie drückt einfach die erforderliche Gleichheit zwischen der Zentrifugalkraft und der Anziehungskraft aus.

Verlöre nun das Elektron Energie, indem es nach den Gesetzen der Elektrodynamik Licht ausstrahlt, dann fiele es in den Kern hinein, ähnlich einem Sputnik, der durch die irdische Atmosphäre ja allmählich gebremst worden ist. Wenn allerdings für das Elektron besondere Bahnen — die stationären Bahnen — existieren, auf denen es nicht den Gesetzen der Elektrodynamik gehorcht und daher kein Licht ausstrahlt, dann müssen ebenso auch zusätzliche Bedingungen existieren, die diese Bahnen aus dem Satz aller möglichen (nach obiger Gleichung) herausheben.

Wie diese zusätzlichen Bedingungen ins Spiel kommen, läßt sich am leichtesten zeigen, indem wir die Analogie mit dem Sputnik fortsetzen.

Die Kreisbewegung besitzt außer dem Radius r der Bahn und der Geschwindigkeit v auf ihr noch eine weitere Charakteristik, den Drehimpuls l. Er ist gleich dem Produkt aus der Masse m, der Geschwindigkeit v und dem Bahnradius r, d.h. $l=mvr$. Der Drehimpuls kann für einen Sputnik beliebige Werte in Abhängigkeit von den Größen r und v annehmen.

Bohr behauptete: Das Elektron im Atom unterscheidet sich vom Mond (oder von einem Sputnik) u.a. dadurch, daß sein Drehimpuls l nicht beliebige Werte annehmen kann. Der Drehimpuls l des Elektrons ist gleich einem ganzzahligen Vielfachen der Größe $\hbar=\frac{h}{2\pi}$. (Diese Größe führte Paul Adrien Maurice Dirac, geb. 1902, ein, einer der Begründer der Quantenmechanik). Es gilt also $mvr=n\hbar$, wobei n eine ganze Zahl ist.

Das ist die gesuchte zusätzliche Bedingung, die von Bohr gefunden wurde. Sie gibt die stationären Bahnen, die einzig zulässigen im Atom, aus der unendlichen Anzahl aller denkbaren Bahnen an. Da bei diesem Aussortieren der Bahnen die Hauptrolle das Wirkungsquant h spielt, nannte man den ganzen Prozeß Quantisierung.

Aus den vorangegangenen beiden Bedingungen erhielt Bohr ohne zu große Schwierigkeiten die Energiewerte E_n und die Radien r_n der stationären Bahnen:

$$r_n=\frac{\hbar^2}{me^2}\cdot n^2; \quad E_n=-\frac{me^4}{2\hbar^2}\cdot\frac{1}{n^2}.$$

Die stationären Bahnen — und folglich auch die Energieniveaus — werden durch die ganzen Zahlen n bzw. k numeriert, die eine unendliche Reihe von Werten durchlaufen können: 1, 2, 3... Beim Übergang vom Niveau k auf das Niveau n strahlt das Elektron die Energie $\Delta E=E_k-E_n$ aus. Die Frequenz der Strahlung, die diesem Übergang entspricht, wird durch die Einsteinsche Formel

$$\nu=\frac{\Delta E}{h}=\frac{E_k-E_n}{2\pi\hbar}$$

bestimmt.

Wenn wir die Ausstrahlung beobachten, die bei den Übergängen des Elektrons von allen möglichen Niveaus

k auf ein bestimmtes Niveau n entsteht, dann sehen wir nicht einfach eine Reihenfolge von Spektrallinien, sondern eine Serie. Ist z.B. $n=2$ und $k=3, 4, 5, 6...$, so werden wir die Balmerserie finden. Hieraus erhält man auch sofort die berühmte Bohrsche Formel für die Frequenz der Strahlung eines Wasserstoffatoms:

$$\nu = \frac{me^4}{4\pi\hbar^3}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right).$$

Was folgt aus dieser Formel?

Einmal erinnert sie stark an die Rydbergsche Formel für das Wasserstoffatom, die Rydberg lange vor Bohr empirisch gefunden hatte und über die wir bereits ausführlich berichteten. Wenn die Bohrsche Formel richtig ist, dann läßt sich aus ihr die Rydbergsche Konstante R berechnen:

$$R = \frac{me^4}{4\pi c\hbar^3}.$$

Man rechnete R aus und fand, daß der so erhaltene Wert mit jenem Wert zusammenfällt, der seit langem aus der Spektroskopie bekannt war.

Dies war der erste Erfolg der Bohrschen Theorie. Er machte auf die Physiker den Eindruck eines Wunders.

Doch das ist nicht alles. Aus der Bohrschen Theorie folgte weiterhin, daß der Radius des Wasserstoffatoms im Grundzustand (Zustand mit niedrigster Energie, d.h. $n=1$) gleich

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{me^2} = 0{,}53 \cdot 10^{-8}\ \text{cm} = 0{,}053\ \text{nm}$$

beträgt.

Dies bedeutete, daß die Ausmaße der Atome ($\approx 10^{-8}$ cm), die nach Bohrs Formel berechnet wurden, mit den Voraussagen der kinetischen Theorie der Materie zusammenfielen.

Schließlich erklärte die Bohrsche Theorie den Zusammenhang zwischen den Linienspektren und der inneren Struktur des Atoms. Intuitiv fühlten die Physiker diesen Zusammenhang schon seit langem. Doch erst Bohr gelang es, ihn mathematisch auszudrücken. Es zeigte sich, daß der gesuchte Zusammenhang über die Plancksche Konstante verwirklicht wird.

Dies war ein unerwartetes Resultat. Der Begriff Wirkungsquantum entstand in der Theorie der Wärmestrahlung und war auf keinerlei offensichtliche Weise weder mit den

Atomen noch mit den von ihnen ausgesandten Strahlen verbunden. Dennoch gestattete er, die absoluten Ausmaße des Atoms auszurechnen und die Lichtfrequenz vorauszusagen, mit der das Atom ausstrahlt. Der feste Glaube an die Einheit der Natur half Bohr, diesen Zusammenhang zu erraten.

Die Bohrschen Postulate lassen sich, wie alle Postulate, weder logisch begründen noch aus einfacheren Postulaten herleiten. Sie bleiben willkürliche Schöpfungen des menschlichen Geistes, solange das Experiment nicht die Schlußfolgerungen aus ihnen bestätigt. Danach entwickelt sich auf ihrer Grundlage die Theorie.

Wir werden uns auf die angeführten drei Schlußfolgerungen aus der Bohrschen Theorie beschränken. Tatsächlich gibt es noch viel mehr. Sie alle gemeinsam zeigen die unerklärbare Gültigkeit dieser Postulate.

Natürlich gelangte Bohr zu seinen Postulaten auf einem etwas anderen Wege als wir. Wenn der Mensch eine unbekannte Höhe besteigt, so läßt sich schwerlich erwarten, daß er den kürzesten Weg dorthin geht. Erst auf der Spitze des Berges kann er sehen, wie man einfacher zu ihr gelangen kann.

Nach Bohr

Ungeachtet ihrer Ungewöhnlichkeit fanden die Bohrschen Postulate verhältnismäßig rasch Anerkennung und viele Anhänger. Wenn man das Verhältnis der Physiker jener Jahre zur Bohrschen Theorie charakterisieren müßte, so würde man an erster Stelle das Gefühl der Erleichterung nennen, ein Gefühl der Befreiung von jenem ständigen Druck, dem sie bis dahin ausgesetzt waren. Sie alle waren gezwungen gewesen, vereinzelt dastehende Tatsachen im Gedächtnis zu behalten und den Versuch zu machen, sie irgendwie miteinander in Beziehung zu setzen. Jetzt gruppierten sich alle atomaren Erscheinungen ganz natürlich um ein zwar unerklärbares, dafür aber einfaches Modell. Einen Teil dieser Erscheinungen erklärte das Modell glänzend, ein anderer Teil dagegen machte die Weiterentwicklung des Modells erforderlich.

Insbesondere ließ sich jetzt Kirchhoffs und Bunsens Versuch mit den Natriumdämpfen sehr einfach erklären.

Solange die Strahlung eines glühenden Körpers die Natriumdämpfe noch nicht passiert hatte, worin sich die Ato-

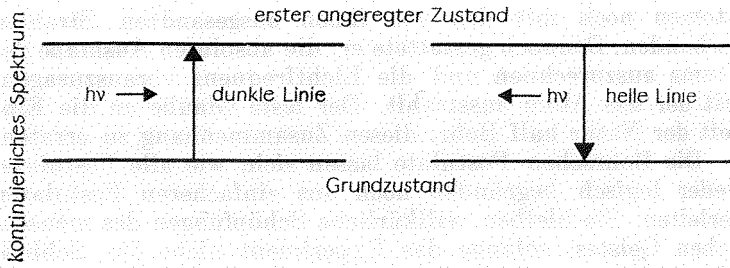

Abb. 14. Erklärung des Versuchs von Bunsen und Kirchhoff

me im Grundzustand befanden, mußte sie noch alle Wellenlängen enthalten. Beim Hindurchtreten durch die Natriumdämpfe indessen mußte die Strahlung Natriumatome aus ihrem Grundzustand in den ersten angeregten Zustand ($n=1$) überführen. Dazu wird die Energie eines Quants $e=h\nu$ aufgewendet, dessen Frequenz ν genau mit der Frequenz der D-Linie im Natriumspektrum übereinstimmt. Darum fehlen in dem Licht, das die Natriumdämpfe passiert hat, die Strahlen dieser Wellenlänge, und an der Skala der Spektrographen sehen wir ein kontinuierliches Spektrum, das in seinem gelben Bereich von einer dunklen D-Linie unterbrochen wird.

Beim umgekehrten Vorgang, wenn also die Natriumatome aus dem angeregten Zustand in den Grundzustand übergehen, strahlen sie Licht der gleichen Frequenz aus, die sie früher verschluckt hatten, und nun entsteht wieder die gleiche D-Linie, diesmal aber leuchtend gelb.

Trotz aller Erfolge der Bohrschen Theorie sahen die Physiker darin doch eher ein bequemes Modell und waren nicht so recht von der Realität der Quantensprünge in der Energie des Atoms überzeugt. Diesen Zweifel beseitigten James Franck (1882—1964) und Gustav Hertz (geboren 1887), ein Neffe des berühmten Heinrich Hertz (1857 bis 1894), und zwar ebenfalls im Jahre 1913. Wie jede einleuchtende Idee erklärte auch Bohrs Theorie nicht nur bereits bekannte Tatsachen, sondern zeichnete auch die Wege zu ihrer Überprüfung vor.

Der Physiker Arnold Sommerfeld (1868—1951) war einer der ersten, der Bohrs Postulaten Glauben schenkte, sie aber auch weiterentwickelte, »wie einst Kepler beim Studium des Planetensystems seinem Harmonieempfinden folgend«.

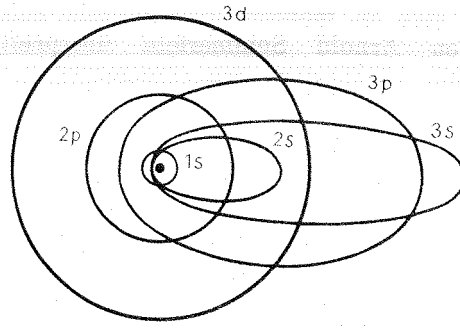

Abb. 15. Elektronenbahnen des Wasserstoffatoms für $n=1, 2, 3$

Er argumentierte so: Wenn das Atom dem Sonnensystem ähnelt, dann kann das Elektron in diesem System nicht nur Kreisbahnen zur Verfügung haben wie im Bohrschen Modell; vielmehr müssen dann auch Ellipsenbahnen zulässig sein, wobei der Atomkern dann in einem der Brennpunkte dieser Ellipsen liegen müßte.

Ellipsen mit gleichgroßen Halbachsen gehören dann zur gleichen Hauptquantenzahl n, da die Energie des Elektrons auf diesen Bahnen gleichgroß ist. Die kleinen Halbachsen der Ellipsen sind verschieden. Ihre Größe hängt allein vom Drehimpuls ab. Ganz im Sinne der Bohrschen Idee schlug Sommerfeld nun vor, daß die Ellipsen bei gegebenem n nicht willkürlich kleine Halbachsen besitzen dürfen, sondern nur solche, bei denen der ihnen entsprechende Drehimpuls l ausschließlich die ganzen Zahlen $l=0, 1, 2, \ldots, n-1$ durchläuft. Die Anzahl der zulässigen Ellipsen ist also nicht größer als die Hauptquantenzahl n, die den stationären Zustand (Zustand ohne Lichtausstrahlung) charakterisiert. Bohr und Sommerfeld bewiesen sogar noch etwas mehr: Wenn man Einsteins spezielle Relativitätstheorie berücksichtigt, dann zeigt sich, daß die Energie des Elektrons auf sämtlichen Ellipsen mit gleicher großer Halbachse verschieden ist. Daher muß man die Energie des Elektrons durch zwei Quantenzahlen, nämlich n und l, charakterisieren.

Aus diesem Grunde müssen die Spektrallinien, die beim Übergang des Elektrons zwischen Energieniveaus mit verschiedenem n entstehen, eine Feinstruktur aufweisen, d.h.,

sie müssen sich in mehrere Bestandteile aufspalten. Auf die Bitte von Arnold Sommerfeld überprüfte Friedrich Paschen (1865—1947) diese Schlußfolgerung der Theorie am Beispiel der Heliumlinie $\lambda=468{,}6$ nm, die einem Übergang des Elektrons vom Niveau $n=4$ auf das Niveau $n=3$ entspricht. Indem er aufmerksam die Fotografie des Spektrums untersuchte, stellte Paschen fest, daß diese Linie in Wirklichkeit aus dreizehn eng aneinanderliegenden Linien besteht. Das war eine erstaunliche Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment. Sie wurde zu ihrer Zeit (1916) mit den Berechnungen von Antoine-Laurent Lavoisier (1743—1794) verglichen, der den Planeten Neptun vorausgesagt hatte.

Bald zeigte sich jedoch, daß selbst die zwei Quantenzahlen n und l nicht alle Besonderheiten des Spektrums erklären konnten. Bringt man z.B. ein ausstrahlendes Atom in ein Magnetfeld, dann spalten sich seine Spektrallinien ganz anders auf, als dies die bisherige Theorie voraussagt.

Die Aufspaltung der Spektrallinien im Magnetfeld versuchte bereits im Jahre 1862 Michael Faraday (1791—1867) in seiner letzten, zu seinen Lebzeiten nicht mehr veröffentlichten Arbeit nachzuweisen. Der Magnet, den er bei seinen Versuchen benutzte, war jedoch zu schwach, um den gewünschten Effekt zu erreichen. Erst im Jahre 1896 beobachtete Pieter Zeeman (1865—1943) jene Erscheinung, die Faraday seinerzeit vergeblich gesucht hatte.

Nach den Arbeiten von Bohr und Sommerfeld wurde die Aufspaltung der Spektrallinien im Magnetfeld folgendermaßen gedeutet. Stellen wir uns einen Elektromotor vor. Ohne die technischen Details seiner Konstruktion zu kennen, wissen wir noch aus der Schulzeit, daß sich der Rotor zu drehen beginnt, sobald durch dessen Wicklungen ein elektrischer Strom fließt. Ein Elektron, das sich auf einer geschlossenen Bahn bewegt, ähnelt einer Stromschleife in der Wicklung des Elektromotors. Und ebenso wie diese Schleife beginnt auch die Elektronenbahn im Magnetfeld eine Drehbewegung auszuführen. Im Unterschied zur Schleife kann sie jedoch nicht beliebige Lagen im Atom annehmen, da dies die Quantengesetze verbieten. Das Wesen dieser Quantengesetze läßt sich am leichtesten verstehen, wenn man auf die beigefügte Abbildung schaut. In dieser Skizze ist das Magnetfeld von unten nach oben gerichtet, während die Elektronenbahn von der Seite abgebildet ist, wobei die

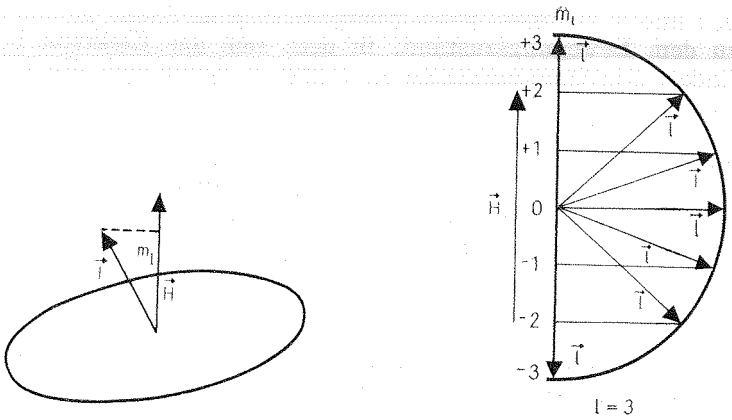

Abb. 16. Räumliche Quantelung des Bahndrehimpulses

kleine Halbachse dem Zahlenwert $l=3$ entspricht. Der Drehimpuls selbst wird durch einen »Pfeil« (genauer durch einen Vektor $\vec{l}$ dargestellt, der immer senkrecht auf der Bahnfläche des Elektrons steht und dessen Länge gleich dem Zahlenwert von $\vec{l}$ ist. Es zeigt sich, daß die Quantengesetze nur solche Lagen der Bahnfläche des Elektrons bezüglich der Richtung des Magnetfeldes $\vec{H}$ zulassen, bei denen die Projektion des »Pfeiles« $\vec{l}$ auf die Richtung des Magnetfeldes gleich einer ganzen Zahl ist. Diese dritte Quantenzahl — die magnetische Quantenzahl m — nimmt, wie man leicht sieht, nur die Werte $m=l$, $l-1\ldots$, $+1,0,-1\ldots$, $-(l-1)$, $-l$ an, d.h. insgesamt also $(2l+1)$ Werte. Somit spaltet sich im Magnetfeld jedes Energieniveau E_{nl} mit fest vorgegebenen Werten der Quantenzahlen n und l noch in $(2l+1)$ Unterniveaus E_{nlm} auf, von denen ein jedes eindeutig durch die Angabe der drei ganzen Quantenzahlen n, l und m bestimmt wird.

Indem die Bohrsche Theorie diese Entwicklung nahm, wurde sie immer komplizierter. Sie verlor ihre ursprüngliche Eleganz und Anschaulichkeit. Anstelle des einfachen Bohrschen Atommodells trat jetzt ein formales Atommodell, von dem nur eines gefordert wurde: eine richtige Systematik der Terme. Der Ausdruck »Quantisierung« verlor allmählich seinen früheren Sinn. Mit ihm bezeichnete man jetzt den formalen Prozeß der Zuordnung ganzer (Quanten-)Zahlen

n, l und m zu einem jeden Energieniveau im Atom, genauer, zu dem Bewegungszustand, in dem sich das Elektron befindet. Die Quantenzahlen n, l und m bestimmen die stationären Bahnen des Elektrons im isolierten Atom. Die äußeren Felder (elektrische und magnetische) beeinflussen die Bewegung des Elektrons im Atom (Aufspaltung der Energieniveaus), und dies findet sofort in der Struktur des Lichtsignals seinen Niederschlag, das vom Atom ausgesandt wird (Aufspaltung der Spektrallinien).

Das formale Atommodell

Die populärwissenschaftliche Darstellung hat ihre Grenzen. Sie ergeben sich in der Regel daraus, daß es von einem bestimmten Augenblick an unmöglich wird, Begriffe und Vorstellungen aus dem Alltag zu verwenden. Zur Überwindung dieser Grenzen muß man sich der Sprache der abstrakten wissenschaftlichen Begriffe bedienen, wenn auch zunächst nur der allereinfachsten. Alle Versuche, diesen Schritt zu vermeiden, führen unausweichlich zu einem dumpfen Mißbehagen, und das eigentliche Wesen der Wissenschaft bleibt dem Leser verborgen. Überwindet man sich jedoch und nimmt man jene Anstrengungen auf sich, die nun einmal notwendig sind, so ist man imstande, die Kraft der logischen Konstruktionen einer Wissenschaft zu erfassen und die Schönheit ihrer Ableitungen zu empfinden. Die hierbei auftretenden Schwierigkeiten sind in der Regel nicht größer als jene, auf die wohl alle Schüler im Chemieunterricht stoßen: Auch sie überzeugen sich verhältnismäßig rasch davon, daß es einfacher (und vor allem verständlicher) ist, die Formel H_2O zu schreiben, als jedesmal zu sagen: »Ein Molekül, das aus zwei Atomen Wasserstoff und einem Atom Sauerstoff« besteht.

Etwas Ähnliches geschieht auch bei der Beschreibung der optischen Spektren, wenn man zu einer neuen Bezeichnungsweise übergeht. Die Hauptquantenzahl n bezeichnet man durch die Zahlen 1, 2, 3..., während der Drehimpuls l durch Buchstaben gekennzeichnet wird, wobei der Zahlenfolge 0, 1, 2, 3... die Buchstabenreihe s, p, d, f... entspricht. Das Symbol $3s$ bezeichnet also das Energieniveau mit den Quantenzahlen $n=3$ und $l=0$, das Symbol $3p$ dagegen steht für das Niveau $n=3$ und $l=1$.

Im nichtangeregten Natriumatom befindet sich das Elek-

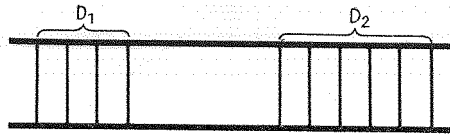

Abb. 17. Aufspaltung der Natrium-D-Linie im Magnetfeld

tron im Zustand 3*s*. Die schwarze D-Linie entsteht im Spektrum des Sonnenlichts dann, wenn bei der Anregung des Natriumatoms durch das Sonnenlicht das Elektron in den Zustand 3*p* übergeht. Beim umgekehrten Prozeß, wenn das Elektron von 3*p* nach 3*s* geht, entsteht die leuchtend gelbe D-Linie.

Was aber geschieht, wenn wir ein Licht ausstrahlendes Natriumatom in ein Magnetfeld bringen? Zunächst nahm man entsprechend den Sommerfeldschen Vorstellungen an, daß sich dabei das obere Niveau 3*p* in drei Komponenten $2l+1=2\cdot 1+1=3$ aufspalten muß, während das untere Niveau demgegenüber unverändert bleibt. Im Endergebnis müssen daher sowohl D_1 als auch D_2 in drei Komponenten aufspalten.

Das Experiment bestätigte diese theoretischen Schlußfolgerungen nicht. Aus der Skizze ist das Versuchsergebnis ersichtlich: Die D_1-Linie spaltet in 4 Komponenten auf, die D_2-Linie dagegen besitzt 6 Komponenten. Diese Erscheinung ist ein Spezialfall des sogenannten anomalen Zeemaneffekts. Um diesen Effekt verstehen zu können, wird es notwendig sein, nochmals ein wenig den zurückgelegten Weg zu verfolgen und sich dabei über eine Frage Klarheit zu verschaffen, die wir bisher nicht berührt haben:

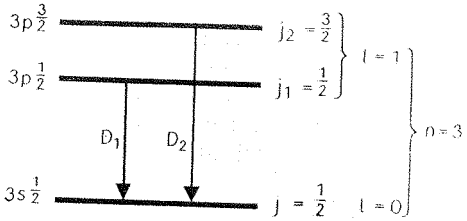

Abb. 18. Aufspaltung der Natrium-D-Linie in D_1 und D_2

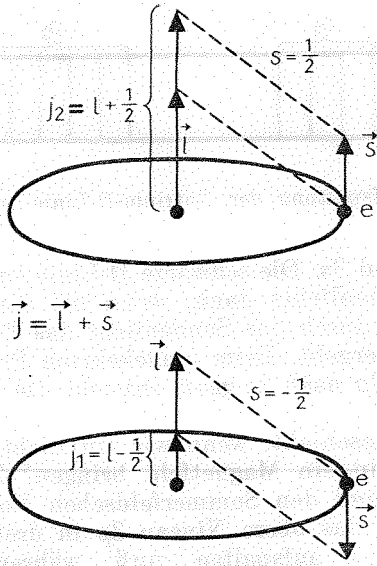

Abb. 19. Vektorielle Addition von Bahndrehimpuls und Eigendrehimpuls

Warum besteht die D-Linie des Natriums selbst bei Abwesenheit eines Magnetfeldes aus zwei eng beieinanderliegenden Komponenten D_1 und D_2?

Nach angestrengtem Nachdenken über dieses Problem gelangte Wolfgang Pauli (1900—1958), ein Schüler Arnold Sommerfelds, im Jahre 1924 zur Entdeckung des Spins des Elektrons (vom englischen Wort »spin«, die Spindel). Pauli argumentierte ungefähr so: Beide Linien D_1 und D_2 entsprechen nach der Sommerfeldschen Theorie ein und demselben Übergang vom Niveau $n=3$, $l=1$ zum Niveau $n=3$, $l=0$. Um die Theorie mit den experimentellen Ergebnissen in Übereinstimmung zu bringen, müssen wir daher im Gegensatz zu Sommerfeld annehmen, daß nicht eine, sondern zwei obere $3p$-Niveaus existieren, denn nur so erhalten wir in dem Modell vom Natriumatom zwei Übergänge nach dem $3s$-Zustand. Folglich existiert auch eine zusätzliche Quantenzahl, die somit die beiden oberen Niveaus voneinander unterscheidet. Die Eigenschaft, die der vierten Quantenzahl S entspricht, nannte Pauli »die nichtklassische des Elektrons«. Er nahm weiterhin an, daß die Quantenzahl

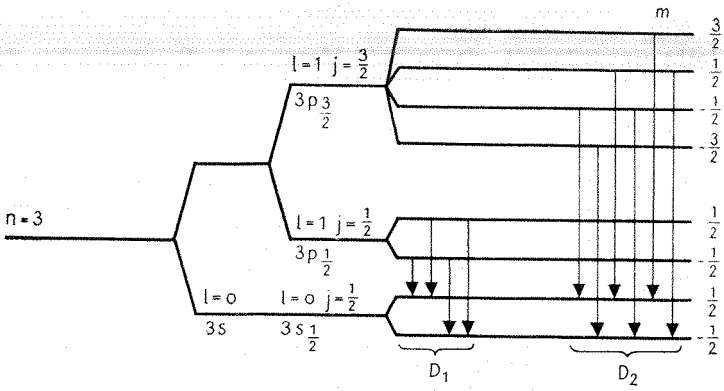

Abb. 20. Vollständige Aufspaltung der Natrium-D-Linie

S nur zwei Werte besitzt: $+\frac{1}{2}$ und $-\frac{1}{2}$. Pauli hielt eine anschauliche Vorstellung dieser Eigenschaft für unmöglich.

Doch schon im darauffolgenden Jahr fanden George Eugene Uhlenbeck (geb. 1900) und Samuel Abraham Goudsmit (geb. 1902) ein anschauliches Modell für diese Eigenschaft des Elektrons, indem sie annahmen, daß es sich um seine eigene Achse dreht. Ein solches Modell folgte unmittelbar aus der Analogie zwischen dem Atom und dem Sonnensystem. Die Erde dreht sich auch nicht nur auf einer Ellipsenbahn um die Sonne, sondern außerdem noch um ihre eigene Achse. (Diese Analogie stellten auch Arthur Holly Compton, 1892—1962, im Jahre 1921 sowie Kronig im Jahre 1923 fest, doch Pauli wandte sich scharf gegen eine solche Vorstellung.)

Uhlenbeck und Goudsmit nahmen an, daß das Elektron außer dem Drehimpuls $\vec{l}$, der nur ganzzahlige Werte annehmen kann und bei der Bewegung des Elektrons auf der Ellipsenbahn entsteht, noch einen inneren Drehimpuls besitzt, den Spin $\vec{S}$, dessen absolute Größe gleich $S=\frac{1}{2}$ ist. Der gesamte Drehimpuls des Elektrons, der sich als die Summe von $\vec{l}$ und $\vec{S}$ ergibt, kann demnach zwei Werte annehmen: $j_1=l-\frac{1}{2}$ und $j_2=l+\frac{1}{2}$, je nachdem, ob die beiden Vektoren $\vec{l}$ und $\vec{S}$ parallel oder antiparallel zueinander liegen. Wenn $l=0$ ist, dann fallen der Gesamtdrehimpuls und der Spin zusammen.

Nun war alles klar: Das Niveau $3s$ im Natriumatom bleibt unverändert, da es dem Moment $l=0$ entspricht, das Niveau $3p$ hingegen spaltet in zwei Niveaus auf, in $3p\frac{1}{2}$ und $3p\frac{3}{2}$, deren Energien sich ein wenig voneinander unterscheiden. Dementsprechend müssen wir statt einer einzigen D-Linie des Natriums zwei eng beieinanderliegende Spektrallinien sehen, wobei die Linie D_1 dem Elektronenübergang $3p\frac{1}{2} \rightarrow 3s\frac{1}{2}$ und die Linie D_2 dem Übergang $3p\frac{3}{2} \rightarrow 3s\frac{1}{2}$ entspricht.

Im Magnetfeld spaltet jedes Niveau, das einem bestimmten Gesamtdrehimpuls $\vec{j}$ entspricht (ganz analog zum Drehimpuls $\vec{l}$), in $(2j+1)$ Komponenten auf, die sich voneinander durch die magnetische Quantenzahl m unterscheiden. Daher spalten die Niveaus $3s\frac{1}{2}$ sowie $3p\frac{1}{2}$ noch in zwei Unterniveaus und das Niveau $3p\frac{3}{2}$ in vier Unterniveaus auf. Im Ergebnis entsteht das Schema der Energieniveaus und der Übergänge zwischen ihnen, wie es in der Abbildung dargestellt ist. Es erklärt vollständig die Struktur der Spektrallinien.

Aus dieser Skizze sieht man gut, wie das ursprüngliche Bohrsche Modell, in dem nur ein Niveau für $n=3$ existierte, immer komplizierter wurde. Zunächst spaltete es sich bei Berücksichtigung der speziellen Relativitätstheorie in zwei Niveaus auf in $3p$ ($n=3$, $l=1$) und $3s$ ($n=3$, $l=0$). Stellt man weiterhin den Spin des Elektrons in Rechnung, so zerfällt das Niveau $3p$ in zwei Unterniveaus in $3p\frac{1}{2}$ ($n=3$, $l=1$, $j=\frac{1}{2}$) und $3p\frac{3}{2}$ ($n=3$, $l=1$, $j=\frac{3}{2}$).

Bei Anwesenheit eines Magnetfeldes erhalten wir ein Niveausystem, das auf unserer Abbildung dargestellt ist und zu einem Spektrallinienbild führt, so wie es im Experiment beobachtet wird.

Die Hypothese über den Spin des Elektrons ist eine der fundamentalsten Hypothesen in der Physik. Bis zum heutigen Tage gelang es jedoch nicht, ihren Sinn vollständig zu verstehen. Pauli hatte recht, als er davor warnte, sich das Elektron als einen rotierenden Kreisel vorzustellen.

Der Einfluß des Spins auf die physikalischen Prozesse

im Atom und auf dessen Struktur tritt zuweilen auf unerwartete Weise zutage. Ein Beispiel dafür ist das berühmte Pauliverbot: Im Atom können zwei Elektronen nicht die gleichen Quantenzahlen n, l, m und S besitzen. Im weiteren werden wir sehen, wie gerade dieses Verbot eine vernünftige Erklärung des periodischen Systems der Elemente von Mendelejew erlaubte.

Schon an der Art der Darstellung haben Sie wahrscheinlich bemerkt, um wieviel ärmer an Anschaulichkeit das formale Atommodell im Vergleich zum Bohrschen Atommodell ist und um wieviel schwieriger sich davon eine anschauliche Vorstellung geben läßt. Aber auch seine Stärke haben Sie wahrscheinlich empfunden. Auf seiner Grundlage lassen sich auch die allerfeinsten Besonderheiten der Spektren erklären und vorhersagen. Es gelang, die erschreckende Anzahl von Spektrallinien zu ordnen. Um jede beliebige Linie im Spektrum eines Atoms eindeutig zu definieren, genügt es nun, acht Quantenzahlen anzugeben: vier Quantenzahlen für den Ausgangszustand des emittierenden Elektrons (n_i, l_i, m_i und S_i) und vier für den Endzustand (n_k, l_k, m_k und S_k).

Im Jahre 1925 war diese Arbeit abgeschlossen. Die »Hieroglyphen« waren dechiffriert, und man konnte nun das erste, wenn auch vorläufig noch recht grobe Bild der inneren Struktur des Atoms entwerfen.

Selbstverständlich ist die Entschlüsselung des Spektrums irgendeines Elements auch heute noch keine leichte Aufgabe, und nur Fachleute vermögen sie qualifiziert zu lösen. Aber auch das Entschlüsseln von Hieroglyphen ist nicht einfach zu erlernen, und nicht jeder braucht es zu können. Da aber der Schlüssel für die Chiffre bekannt ist, kann auch jeder damit umgehen lernen. Jedenfalls schrecken die langen Tabellen der Spektrallinien heute niemanden mehr, ebensowenig wie die Zoologen und Botaniker die Millionenzahl der Pflanzen- und Tierarten nicht mehr beängstigt, nachdem Linné, Lamarck, Darwin u.a. alle Arten einer strengen Systematik unterworfen haben.

Ungeachtet seiner Erfolge genügte das formale Atommodell nicht dem Kriterium der logischen Einfachheit, die ja etwas für jeden offenkundig macht. Gerade das aber war ja der entscheidende Vorzug des Bohrschen Atommodells geweses. Allmählich wurde es nun so kompliziert, daß sich ein gewisses Mißtrauen sowie allgemeine Ermüdung breit machten, den Empfindungen sehr ähnlich, die die Physiker

vor Bohrs Darstellung beherrscht hatten. Alle Versuche schließlich, Bohrs Atommodell auf kompliziertere Atome anzuwenden, blieben erfolglos. Ratlos begannen die Physiker schließlich, alles und jedes in Zweifel zu ziehen: die Gültigkeit des Coulombschen Gesetzes, die Anwendbarkeit der Elektrodynamik und der Mechanik auf atomare Systeme und sogar den Energieerhaltungssatz. Dabei war im Grunde genommen fast allen klar, daß diese Krise aus dem Zusammenstoß empirischer Daten mit den Prinzipien der Quantentheorie und den Überresten klassischer Vorstellungen entstanden war, auf die man vorläufig nicht verzichten konnte, weil nicht klar war, was an ihre Stelle treten konnte.

Bei der Erforschung der Quantenerscheinungen benutzten die Forscher nach wie vor Begriffe der klassischen Physik. Die atomaren Objekte besaßen indessen keine Eigenschaften, die diesen Begriffen entsprachen, und daher wurden der Natur im Prinzip »sinnlose«, also ungeeignete Fragen gestellt. Sie waren in einer Sprache formuliert, die die Natur nicht »verstehen« konnte. Nachdem die Physiker das erkannt hatten, begannen sie nach einem allgemeinen Prinzip zu suchen, aus dem sich sowohl das formale Atommodell als auch die übrigen Besonderheiten atomarer Objekte logisch ergeben. »Mag dieses einheitliche Prinzip zu Anfang auch unverständlich sein, Hauptsache, es erklärt alles«, so lautete der allgemeine Wunsch.

Im Ergebnis dieser Bestrebungen entstand im Jahre 1925 die Quantenmechanik — die Wissenschaft von der Bewegung der Elektronen im Atom. Sie wurde durch eine neue Generation von Physikern geschaffen, zu denen Werner Heisenberg (geb. 1901), Paul Dirac (geb. 1902), Wolfgang Pauli (1900—1958), Louis Victor de Broglie (geb. 1892) und Erwin Schrödinger (1887—1961) gehörten.

Rund um das Quant

Niels Hendrik David Bohr

Wie jede wahrhaft große Entdeckung war auch die Entdeckung Bohrs schwer zu vollbringen, aber leicht zu verstehen. Die Stärke der Bohrschen Ideen liegt in ihrer Einfachheit und Zugänglichkeit, die des Beweises nicht bedurften. Im Grunde genommen vermag sie jeder aufgeschlossene Mensch zu verstehen. Bohr schuf ein Modell, mit des-

sen Hilfe man sich in den ungewöhnlichen Begriffen der Quantenmechanik zurechtfinden konnte und das oft als Symbol für den wissenschaftlich-technischen Fortschritt unseres Jahrhunderts verwendet wurde. Berücksichtigt man darüber hinaus, daß dieses Modell bei all seiner Einfachheit die Grundeigenschaften des Atoms richtig beschreibt, dann wird seine außerordentliche Bedeutung sogleich klar.

Am 3. März 1972 wurde die Raumsonde »Pioneer 10« in Richtung des Planeten Jupiter geschickt, den sie Ende 1973 passierte. An Bord dieser Sonde, die nun in den Weltraum weiterfliegt, befindet sich auch eine Platte, in die die Umrisse eines Mannes und einer Frau eingraviert sind. Die Botschaft der Erde an mögliche außerirdische Intelligenzen enthält auch die Anordnung des Sonnensystems und die Prinzipdarstellung eines Wasserstoffatoms — das Wichtigste, was die Menschen anderen Zivilisationen mitzuteilen für gut befunden haben.

Unter 100 aufs Geratewohl ausgewählten Physikern dürften heute wohl nur ein oder zwei Bohrs berühmte Arbeiten gelesen haben, die 1913 veröffentlicht worden sind. Doch jeder von ihnen ist imstande, die in diesen Arbeiten dargelegten Ideen ausführlich zu erklären. Darüber hinaus aber läßt sich sagen, daß Bohrs Ideen heute längst nicht mehr nur Gegenstand der Wissenschaft, sondern auch Element der Allgemeinbildung geworden sind, das höchste Ziel, das eine Theorie überhaupt zu erreichen vermag.

»Wem es beschieden war, der Welt eine große, fruchtbare Idee zu schenken, bedarf des Ruhmes der Nachwelt nicht. Sein Schöpfertum hat ihm ein höheres Gut gewährt.« Diese Worte Albert Einsteins über Max Planck gelten in gleichem Maße auch für Niels Bohr.

Während eines Aufenthaltes in der Sowjetunion besuchte Niels Bohr auch Grusinien. Es war im Tal Alasani, wo Bohr gemeinsam mit einer Gruppe grusinischer Physiker Entspannung suchte. In ihrer Nähe hatten es sich einige Bauern bequem gemacht, die Weim tranken und nach altem Brauch unter der Leitung ihres Wortführers, ihres »Ältesten«, Lieder sangen. Niels Bohr zog es zu ihnen hin, wißbegierig wie immer, und er wurde von den Bauern mit traditioneller Herzlichkeit eingeladen, ihr Gast zu sein. Die grusinischen Physiker erklärten, daß der Fremde ein berühmter Physiker aus Dänemark sei und Niels Bohr heiße. Es bedurfte keiner weiteren Erklärungen. Der Wortführer

unterbrach sie mit einer Handbewegung, wandte sich an die fröhliche Runde und brachte folgenden Trinkspruch aus: »Freunde! Wir haben einen der größten Wissenschaftler der Welt bei uns zu Gast, Professor Niels Bohr. Er schuf die moderne Atomphysik. Seine Erkenntnisse werden in den Schulen aller Länder gelehrt. Wir wünschen ihm und seinen Begleitern ein langes Leben, Glück und Gesundheit. Möge sein Land in Frieden und Wohlstand leben.«

Niels Bohr hatte sein ganzes Leben inmitten der Paradoxa der Quantenmechanik zugebracht und klar und nüchtern zu denken gelernt. Doch selbst ihn bewegte zutiefst diese Begegnung mit den grusinischen Bergbauern, die von der modernen Atomtheorie gehört hatten.

Der experimentelle Beweis für die Postulate Bohrs

Im Jahre 1913 führten Franck und Hertz eine Versuchsreihe durch, die dem Versuch Kirchhoffs und Bunsens sehr ähnlich war: Anstelle von Natriumatomen wurden Quecksilberatome verwendet und statt eines Lichtstrahls wurde ein Elektronenstrahl auf die Atome geschickt, wobei die Energie der Elektronen im Versuch geändert werden konnte. Hierbei beobachteten Franck und Hertz eine interessante Erscheinung: Solange die Energie der Elektronen unter einer bestimmten Größe blieb, glich auch die Anzahl der Elektronen, die die Quecksilberatome passierten, der Anzahl der Elektronen, die auf die Quecksilberatome »geschossen« wurden. Erreichte ihre Energie jedoch einen bestimmten Wert (der bei ihrem Versuch 4,9 $eV = 7{,}84 \cdot 10^{-12}$ erg betrug), dann verringerte sich die Anzahl der austretenden Elektronen sehr stark. Die eintretenden Elektronen wurden von den Quecksilberatomen verschluckt. Gleichzeitig leuchtete im Spektrum des Quecksilberdampfes eine helle violette Linie auf, die eine Wellenlänge von $\lambda = 253{,}6$ nm, d.h. eine Frequenz $\nu = 1{,}18 \cdot 10^{-15}$ s^{-1} besaß. Die Energie eines solchen Quants beträgt $E = h\nu = 6{,}62 \cdot 10^{-27} \cdot 1{,}2 \cdot 10^{15} = 7{,}82 \cdot 10^{-12}$ erg, d.h., sie ist nahezu gleich der vom Elektron aufgewendeten Energie. Offenbar entsteht diese Strahlung beim Übergang des Quecksilberatoms aus dem angeregten Zustand in den Grundzustand.

Dieser Versuch stellt einen direkten experimentellen Beweis für die beiden Postulate Bohrs dar: Im Atom existieren tatsächlich stationäre Zustände, und deshalb ist es nicht

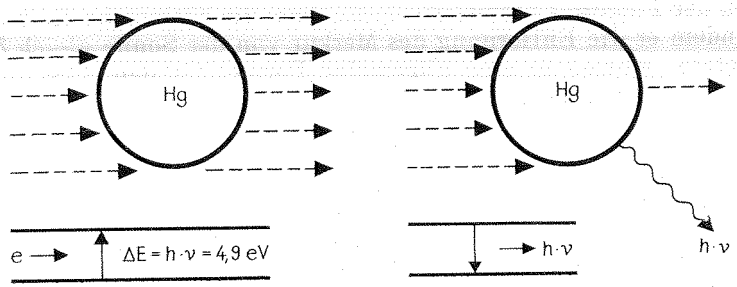

Abb. 21. Franck-Hertz-Versuch

imstande, beliebige Energieportionen zu verschlucken. Elektronenübergänge zwischen den stationären Zuständen des Atoms sind nur in Form von Sprüngen möglich, und die Frequenz der ausgesandten Strahlung ergibt sich aus der Energiedifferenz dieser Niveaus und wird nach Einsteins Formel $\Delta E = h\nu$ berechnet.

Die »Quantisierung« des Sonnensystems

Wir haben das Atom bereits wiederholt mit dem Sonnensystem verglichen. Das hat seinen tieferen Sinn darin, daß das Sonnensystem ebenso wie das Atom einer gewissen »Quantisierungsregel« gehorcht. Diese Vorschrift hat mit der Quantenmechanik nichts gemeinsam; interessant indessen bleibt die Tatsache, daß die Entfernungen der Planeten von der Sonne (ebenso wie die Bahnradien im Atom) sich nicht ungeordnet ändern, sondern einem recht strengen Gesetz gehorchen. Diese Tatsache war bereits Johannes Kepler bekannt.

Professor J. K. Titius stellte im Jahre 1766 eine Tabelle der mittleren Planetenabstände von der Sonne auf, wobei als Maßeinheit für die Länge der vierte Teil der Entfernung des Planeten Merkur von der Sonne genommen wurde:

Merkur	$4 = 4$
Venus	$7 = 4 + 1 \cdot 3$
Erde	$10 = 4 + 2 \cdot 3$
Mars	$16 = 4 + 4 \cdot 3$
Jupiter	$52 = 4 + 16 \cdot 3$
Saturn	$100 = 4 + 32 \cdot 3$

Später kam noch der Uranus dazu:

Uranus	$196 = 4 + 64 \cdot 3$

In der Folgezeit präzisierte J. E. Bode die Titiussche Reihe. Indem er die Entfernung des Merkur von der Sonne gleich 8 setzte, schrieb er eine allgemeine Formel für den Abstand R der Planeten von der Sonne auf:

$$R = 8 + 3 \cdot 2^n,$$

wobei $n = -\infty$, 1, 2, 3, 5, 6, 7 beträgt.

In diesem Schema fehlt der Planet mit der Nummer $n=4$, der zwischen dem Mars und dem Jupiter liegen müßte. An dieser Stelle befindet sich der Asteroidengürtel. Nach Meinung einiger älterer Astronomen handelt es sich bei diesen kleinen Planeten (Asteroiden) um die Trümmer eines früheren großen Planeten namens Phaeton.

Die Deutung der Titius-Bodeschen Reihe ist Aufgabe der Kosmogonie des Planetensystems und wird erst mit der Enträtselung des Ursprungs unseres Planetensystems ihren Abschluß finden.

Mendelejew schafft Ordnung

Stellen Sie sich vor, Sie hätten die Absicht, eine lebende Zelle zu studieren. Zu diesem Zweck führen Sie alle möglichen Versuche aus: Sie erwärmen, bestrahlen und zerstören die Zelle und betrachten Sie dabei jedesmal sorgfältig im Mikroskop. Freilich wird unser Wissen über die Zelle unvollständig bleiben, solange wir nicht berücksichtigen, daß die Zelle ein Teil des lebenden Organismus ist und nur hier sämtliche Eigenschaften vollständig entfaltet.

Ähnlich verhält es sich mit dem Atom. Wir haben bislang absichtlich versucht, das Atom von seiner Umgebung isoliert zu betrachten, und nur jene Experimente ausgewählt, die die komplizierte Struktur eines Einzelatoms zu erklären vermögen. Lange vor diesen Versuchen jedoch hatte Dmitri Iwanowitsch Mendelejew (1834—1907) festgestellt, daß die Atome der verschiedenen Elemente eine Einheit in Form eines »natürlichen« Systems der Elemente bilden.

Ein Jahr nach der Entwicklung des periodischen Systems der Elemente schrieb Mendelejew: »Man kann leicht zu der Annahme gelangen, obwohl vorläufig die Möglichkeit fehlt, dies zu beweisen, daß die Atome aus einfachen Körpern aufgebaute komplizierte Gebilde darstellen, entstanden durch Kombination einer Reihe noch kleinerer Partikeln, und daß das von uns als unteilbar angesehene Atom nur bei Einsatz gewöhnlicher chemischer Kräfte unteilbar ist... Ungeachtet der ganzen Unsicherheit und Willkür, die in dieser Annahme liegt, neigt man sich ihr bei einer Bekanntschaft mit der Chemie unwillkürlich zu. Deshalb wird eine Lehre dieses Inhalts bereits seit langem in verschiedenen Formen immer wieder vorgetragen, und die von mir dargestellte periodische Abhängigkeit zwischen den Eigenschaften und dem Gewicht bestätigt offenbar diese Vorahnung, die, wenn man so sagen darf, für Chemiker so charakteristisch ist.«

Hier ist anzumerken, daß die Chemiker sich zu keiner Zeit mit dem Gedanken abfinden konnten, es gäbe eine von

einander unabhängige Menge qualitativ verschiedener Elemente. Deshalb hatten sie immer danach gestrebt, die qualitative Vielfalt auf eine einfache und klare Idee zu reduzieren, derzufolge die verschiedenen Elemente unterschiedliche Anordnungen von Partikeln der gleichen Art darstellen.

Solche Versuche hatten bereits im Altertum begonnen. Demokrit (etwa 460—370 v.u.Z.) glaubte, daß alle Stoffe in der Natur aus Atomen aufgebaut sind und daß die Eigenschaften dieser Stoffe von den verschiedenen Atomkombinationen abhängen. Aristoteles (384—322 v.u.Z.) behauptete, daß alles Existierende aus Elementen besteht, die selbst Träger bestimmter Eigenschaften sind.

Ein Nachhall dieses so weit zurückliegenden Streites macht sich noch in unserer Zeit bemerkbar: Das Wort »Atom« ruft in uns unwillkürlich die Vorstellung von irgend etwas Festem und Massivem wach. Hören wir den Begriff »chemisches Element«, dann versuchen wir, uns irgendeine reine Qualität ohne Bezug zu deren Träger vorzustellen. Möglicherweise hat sich die Lehre von den chemischen Elementen anfangs deshalb gänzlich unabhängig von der Atomidee entwickelt. Erst allmählich ergab sich eine so enge Verflechtung beider Lehren, daß man sie nicht mehr zu unterscheiden vermochte.

Wir haben bisher die »physikalischen Quellen« der Wissenschaft vom Atom verfolgt. Nun ist die Zeit gekommen, ihre »chemischen Quellen« aufzusuchen.

Die Lehren des Altertums

Die Philosophen der ionischen Schule, deren berühmtester Vertreter Thales von Milet (um 625—546 v.u.Z.) war, kannten nur ein Element, das Wasser, »auf welchem die Erde ruht und das den Ursprung von allem bildet, was existiert«. Später fügte Empedokles (490—430 v.u.Z.) noch drei weitere Elemente hinzu: die Erde, das Feuer und die Luft. Schließlich erweiterte Aristoteles (384—322 v.u.Z.) diese vier Elemente um ein fünftes, die »quinta essentia«, woran uns heute noch das Wort »Quintessenz« erinnert.

Ähnliche Vorstellungen entwickelten sich auch in der indischen Philosophie. Doch im Unterschied zu der materialistischen Auffassung einiger Philosophen des alten Griechenland, die unter den Elementen Substanzen verstanden,

die auf unsere Sinnesorgane einwirken, stellte man sich die Elemente in Indien als gewisse Erscheinungsformen eines allmächtigen Geistes vor. Es gab in der indischen Philosophie fünf Elemente, entsprechend der Anzahl unserer Sinne, die zu ihrer Wahrnehmung befähigt sind: Der Äther entsprach dem Gehör, der Wind dem Tastsinn, das Feuer dem Augenlicht, das Wasser dem Geschmack und die Erde dem Geruchssinn. Der Philosoph Kanāda, von dem wir bereits gesprochen haben, fügte diesen fünf Elementen noch vier weitere hinzu: die Zeit, den Raum, die Seele und »Manas« (das Medium, mit dessen Hilfe die Sinneseindrücke der »Seele« übermittelt werden). Außerdem behauptete er, daß die vier Elemente Erde, Wasser, Feuer und Luft aus Atomen bestünden.

Im Mittelalter wurde die Lehre von den Elementen durch die Alchimisten zu neuem Leben erweckt. Unter den Elementen verstanden sie (wie Aristoteles) nicht Stoffe, sondern Eigenschaften oder »Prinzipien«. Das Quecksilber war das »Prinzip« des metallischen Glanzes, der Schwefel stellte die Brennbarkeit und das Salz die Löslichkeit dar. Sie waren fest davon überzeugt, daß man durch Vermischung dieser Prinzipien in ganz bestimmten Verhältnissen jeden beliebigen in der Natur vorkommenden Stoff erzeugen könnte.

Mit dem Wort »Alchimie« verknüpfen wir heute meist sagenhafte Erzählungen über die Umwandlung von Quecksilber in Gold, über die Gewinnung eines »Lebenselixiers« und dergleichen Wunder. Stöbert man ein wenig in alten Archiven, findet man viele Beispiele für spekulative Fragestellungen. Allerdings fanden manche Alchimisten bei ihrer Probiererei auch allerlei Nützliches, u.a. den Spiritus (Alkohol). Das Hauptverdienst der Alchimisten besteht tatsächlich darin, daß ihr wahlloses Experimentieren allmählich zur Anhäufung vieler Fakten führte, ohne die die Chemie als Wissenschaft niemals entstanden wäre.

Erste Versuche

Im 17. Jahrhundert mußten die Alchimie und die spekulative Naturphilosophie der Chemie und der Physik weichen. Im Jahre 1642 erschien Joachim Jungius' (1587 bis 1657) Werk »Dispute über die Prinzipien der Materie«, das er mit folgenden Worten beschloß: »Welche Prinzipien für

homogene Körper als primär anzusehen sind, kann nicht erraten, sondern muß ausschließlich auf der Grundlage sorgfältiger detaillierter und hartnäckiger Beobachtungen erkannt werden.«

Im Jahre 1661 erschien das berühmte Buch »Der skeptische Chemiker« von Robert Boyle (1627—1691), in dem er die chemischen Elemente als »gewisse einfache oder völlig unvermischte Stoffe« definierte.

Dies ist im Grunde genommen die erste Definition eines chemischen Elements: Es ist in erster Linie ein Stoff, eine Substanz und keineswegs ein »Prinzip«, ein Substrat oder eine Idee. Unklar blieb nur, wie man die Elemente aus den in der Natur vorkommenden Stoffen abtrennen und nach welchem Merkmal man reine Elemente von deren Gemischen oder Verbindungen unterscheiden könnte. Boyle selbst nahm an, daß Wasser das einzige »reine« Element sei, während er Gold, Kupfer, Quecksilber und Schwefel zu den chemischen Verbindungen und Gemischen rechnete.

Antoine-Laurent Lavoisier (1743—1794) akzeptiert uneingeschränkt Boyles Lehre von den Elementen, doch sie genügte nicht mehr den durch neue Experimente gewonnenen Erkenntnissen. Deshalb ging er einen Schritt weiter: Er wollte die Elemente aus ihren chemischen Verbindungen herauslösen. Er war einer der ersten Chemiker, der die Waage nicht zur Zubereitung von Pülverchen und Mischungen, sondern für Forschungszwecke einsetzte. Er ging dabei von folgender für seine Zeit sehr kühnen Voraussetzung aus: Jedes Element innerhalb einer Verbindung wiegt weniger als die Verbindung insgesamt.

Unter konsequenter Anwendung dieses Prinzips stellte er eine Tabelle auf, die etwa 30 Elemente enthielt. Lavoisiers Ansichten widersprachen den damals allgemeingültigen Anschauungen so sehr, daß einige seiner Gegner, die verbissen die Phlogistonlehre verteidigten, in Deutschland eine öffentliche Verbrennung seines Porträts veranstalteten.

In den folgenden Jahren wurde Lavoisiers Tabelle beständig ergänzt. Besondere Anerkennung verdient das Wirken des »Königs der Chemiker« Jöns Jakob von Berzelius (1779 bis 1848), der über 2000 Stoffe analysierte und einige neue Elemente entdeckte. (Übrigens war er es, der 1814 die heute üblichen Symbole der chemischen Elemente, bestehend aus

den ersten Buchstaben ihrer lateinischen oder griechischen Bezeichnungen, einführte.)

Zu dieser Zeit kannte man bereits ungefähr 60 Elemente, also nicht so viele, wie Demokrit für möglich hielt, aber auch nicht so wenige, daß der Gedanke abwegig war, sie könnten doch miteinander in Beziehung stehen. So entstand die Vermutung, daß die Gesamtheit der Elemente ein einheitliches System bildete, und man begann, nach diesem System zu suchen.

Im Grunde genommen hatte diese Suche niemals aufgehört, selbst zu einer Zeit nicht, als sie noch verfrüht war. Beispielsweise war Marnet bereits 1786 davon überzeugt, »daß alles in der Natur Existierende eine kontinuierliche Folge bildet« und daß »man alles — vom feinsten Staubkörnchen im Sonnenstrahl bis zum allerheiligsten Seraphim — zu einer Stufenleiter der Schöpfung ordnen kann«.

Im Jahre 1815 entwickelte der englische Arzt und Chemiker William Prout (1786—1850) die Marnetsche Idee von der Verwandtschaft der Elemente weiter. Er schlug eine einfache Hypothese vor, nach der sich bei der Kondensation von Wasser alle Elemente bilden.

Wir wollen hier nicht weiter auf alle Versuche zur Auffindung eines Systems der Elemente eingehen. Wir nennen, stellvertretend für viele andere, nur die Namen Johann Wolfgang Döbereiner (1780—1849), Max von Pettenkofer (1818—1901), John Hall Gladstone (1827—1902), William Odling (1829—1921) und John Alexander Reina Newlands (1838—1898). Weit wichtiger ist es, die Ideen und Anregungen zu verfolgen, die den Anstoß für alle diese Arbeiten bildeten.

Die Existenz der chemischen Elemente löste stets Verwunderung aus, und auch heute noch dürfte die Vielfalt, in der sie sich in wahrnehmbaren Erscheinungen manifestiert, noch immer Erstaunen auslösen. In der Tat: Ist es nicht merkwürdig, daß unsere ganze Welt mit den vielen Farben, Gerüchen, Geräuschen, Formen und menschlichen Leidenschaften dennoch aus nur einigen wenigen Elementen aufgebaut ist. Dabei sind diese Elemente selbst in der Regel unansehnlich und erinnern ganz und gar nicht an jene farbenfrohe Welt, die aus ihnen aufgebaut ist.

Der Verwunderung folgt allerdings bei dem Wissenschaftler auch stets das Bedürfnis, die Eindrücke, die den Anlaß des Erstaunens bildeten, zu ordnen. Jeder Versuch, etwas

in ein System zu bringen, läßt zugleich die Frage entstehen: Nach welchem Merkmal soll die Anordnung erfolgen? Wenn wir eine Schachtel mit lose hineingeschütteten Würfeln vor uns haben, die numeriert sind, dann können wir sie sehr leicht sortieren. Wir brauchen sie nur in der Reihenfolge ihrer Nummern auszulegen. Aber nun stellen wir uns einmal vor, daß wir anstelle der Würfel Reagenzgläser mit den chemischen Elementen vor uns hätten. In diesen Reagenzgläsern sehen wir Stoffe verschiedener Farbe und verschiedenen Geruchs, feste und flüssige ebenso wie leichte und schwere Stoffe. Welche dieser Eigenschaften sollte man der Klassifikation zugrunde legen? Nun, wir könnten die Reagenzgläser beispielsweise so anordnen, daß ihre Farben einen Regenbogen ergeben. Das sieht zwar schön aus, doch für die Wissenschaft von den Elementen ist es ganz nutzlos: Jede Klassifizierung hat nur dann einen Sinn, wenn mit ihrer Hilfe die Klärung wesentlicher Eigenschaften oder struktureller Besonderheiten gelingt.

Wozu wäre eine Klassifikation überhaupt nützlich, wenn sie nicht unser instinktives Streben nach Einfachheit befriedigte? Hier muß mit Nachdruck festgestellt werden, daß ohne eine Klassifikation keinerlei Wissenschaft möglich ist. Das Gehirn des Wissenschaftlers ist nur ein kleiner Teil der Natur, und so kann der Wissenschaftler nur dann auf eine Erkenntnis der gesamten Natur hoffen, wenn er lernt, aus dem Wust von Einzelheiten die Hauptzüge herauszugliedern.

Genau darin besteht das Wesen der Klassifikation: Aus der Vielzahl der Eigenschaften, die Gegenstände oder Erscheinungen nun einmal besitzen, müssen ein oder zwei Eigenschaften ausgewählt werden, und zwar so, daß damit die Gesetzmäßigkeiten der Veränderung aller übrigen Eigenschaften geklärt werden.

Die chemischen Elemente besitzen sehr viele Eigenschaften. Wie sollte sich sonst auch aus ihnen die Welt aufbauen? Ihre wichtigste Eigenschaft besteht in ihrer Fähigkeit, miteinander chemische Reaktionen einzugehen. Also müßte man eben diese Eigenschaft der Elemente auch ihrer Klassifikation zugrunde legen. Aber es gibt kein Verfahren, die Reaktionsfähigkeit der Elemente exakt zu messen bzw. sogar genau zu definieren. Damit wird jegliche Klassifizierung nach dieser Eigenschaft unmöglich. Wenn sie nicht willkürlich sein soll, dann muß sich die Klassi-

fizierung auf Zahlen stützen, d.h., alle Elemente müssen nach einer Eigenschaft geordnet werden, die sich exakt messen läßt.

Aber auch hier liegen die Dinge keineswegs so einfach, wie man vermuten könnte. Beispielsweise vermögen wir die Dichte der Elemente genau zu messen und können sie doch nicht zur Grundlage einer Systematik machen, weil es unter den Elementen bei normalen äußeren Bedingungen Gase, Flüssigkeiten und Festkörper gibt.

Die Vielzahl mißglückter Versuche, ein System der Elemente zu finden, führte schließlich zu der Einsicht, daß es unter den verschiedenen Eigenschaften der Elemente, die der unmittelbaren Beobachtung zugänglich sind, jene einzige Eigenschaft nicht gibt, die man ihrer Klassifikation zugrunde legen müßte. Die gesuchte Eigenschaft, nämlich das Atomgewicht des Elements, liegt nicht im Bereich der Chemie, sondern gehört der Physik an. Der Augenblick, als diese Tatsache erkannt wurde, darf als Anfang der modernen Wissenschaft von den chemischen Elementen angesehen werden. John Dalton (1766—1844) unternahm diesen entscheidenden Schritt.

Elemente und Atome

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts schätzte man in der Wissenschaft vor allem die Kunst exakter Experimente, denn diese führten im Ergebnis zu Zahlen, und Zahlen lügen nicht. Weil aber John Dalton diese Eigenschaft des exakten Experimentierens fehlte, war es häufig den Angriffen »ehrbarer« Wissenschaftler ausgesetzt. »Seine mit eigener Hand gefertigten Instrumente waren zur Erzielung genauer Resultate ungeeignet, und seine Art zu experimentieren war nachlässig, um nicht zu sagen schlampig«, schrieb einer seiner Biographen über ihn.

Seiner Denkweise nach war Dalton ein typischer Theoretiker, so wie wir heute diese Tätigkeit verstehen. Deshalb darf man ihm die Ungenauigkeiten in seinen Experimenten nicht allzusehr in Rechnung stellen. Auf der Grundlage dieser — wenn auch ungenauen — Ergebnisse kam er zu jenen einleuchtenden und fruchtbaren Ideen, die die Entwicklung der Chemie in den folgenden 100 Jahren bestimmten. Daltons Entdeckungen gaben den experimentellen Weg zur Überprüfung der Atomhypothese an. Er definierte das

Element als einen Stoff, der aus Atomen ein und derselben Art besteht. Die Atome verschiedener Elemente unterscheiden sich voneinander nach ihrem Gewicht und bleiben bei allen stofflichen Umsetzungen unverändert; nur die Anordnung der verschiedenen Atome ändert sich dabei, so daß chemische Umsetzungen durch die Umgruppierung der daran beteiligten Atome charakterisiert werden.

»Wir könnten mit dem gleichen Erfolg versuchen, dem Sonnensystem einen neuen Planeten hinzuzufügen, wie ein Wasserstoffatom zu vernichten oder zu erschaffen«, schrieb Dalton.

Mit Dalton beginnt die moderne Geschichte des Atoms. Er war der erste, der der Atomhypothese vertraute und zugleich nach den aus ihr ableitbaren und experimentell nachweisbaren Folgerungen zu suchen begann. Seine Überlegungen bestanden etwa im folgenden: Nehmen wir an, daß alle Elemente aus Atomen bestehen. Dann müßten z. B. in 16 g Sauerstoff N Atome enthalten sein. Nehmen wir weiter an, wir verbrennen in dieser Sauerstoffmenge Wasserstoff. Es macht keine Schwierigkeit, nachzumessen, daß 2 g Wasserstoff verbrannt werden müssen, um 16 g Sauerstoff zu verbrauchen; im Ergebnis erhalten wir 18 g Wasser.

Die erste Vermutung, die ein Anhänger der Atomhypothese zur Interpretation dieses Ergebnisses aufstellen könnte, besteht darin, daß sich jedes Sauerstoffatom O mit einem Wasserstoffatom H verbindet und daß dabei ein Molekül Wasser mit der Formel HO entsteht. So dachte auch Dalton.

Später bewies Berzelius, daß Dalton darin ein wenig unrecht hatte, weil sich nämlich mit jedem Sauerstoffatom zwei Wasserstoffatome verbinden, so daß die Formel des Wassers die Form H_2O erhält. Das Wichtigste an dieser ganzen Überlegung ist allerdings die Grundidee: Mit jedem Sauerstoffatom verbindet sich eine ganzzahlige Anzahl von Wasserstoffatomen. Wenn also in 16 g Sauerstoff N Atome enthalten sind, dann liegen in 2 g Wasserstoff 2 N Atome vor. Dies aber bedeutet, daß ein Sauerstoffatom sechzehnmal schwerer als ein Wasserstoffatom ist.

So erhielt man die Möglichkeit, die Gewichte der Atome (genauer: die Massen) verschiedener Elemente miteinander zu vergleichen. Nun entstand auch der Begriff Atomgewicht (relative Atommasse). Das Atomgewicht eines Elementes

gibt an, wievielmal schwerer das Atom dieses Elementes als das Wasserstoffatom ist. Nach dieser Definition wurde das Atomgewicht des Wasserstoffs gleich 1 gesetzt, und auf solche Weise war das Atomgewicht des Sauerstoffs gleich 16.

Dank dieser Überlegung war man jetzt imstande, die Atomgewichte aller übrigen Elemente zu messen, indem man ihre Verbindungen mit Sauerstoff und Wasserstoff untersuchte. Beispielsweise konnte man sich jetzt davon überzeugen, daß in 16 g Sauerstoff die Verbrennung von nur 16 g Schwefel gelingt, wobei Schwefeldioxid entsteht. So verbindet sich also mit jedem Schwefelatom ein Sauerstoffatom nach der Formel $S+O=SO$. Daraus folgt dann, daß das Atomgewicht des Schwefels gleich 16 ist. Nimmt man allerdings (wie wir heute wissen) an, daß die Verbrennung des Schwefels nach der Formel $S+O_2=SO_2$ erfolgt, dann muß das Atomgewicht des Schwefels gleich 32 gesetzt werden.

Aus diesem Beispiel erkennen wir, daß die Atomhypothese für sich allein noch nicht ausreicht, um die Zusammensetzung chemischer Verbindungen vorauszusagen. Sie läßt aber nur solche Fehler zu, bei denen wir uns in der Anzahl der Bestandteile in der chemischen Formel um ein ganzzahliges Vielfaches irren. Wir können nun beispielsweise von vornherein sagen, daß sich mit 32 g Schwefel, worin N Atome enthalten sind, entweder N, $2N$, $3N$ usw. Wasserstoffatome verbinden, d.h. 1 g, 2 g oder 3 g, jedoch auf keinen Fall 1,35 g Wasserstoff. Ebenso verhält es sich bei den Oxiden des Stickstoffs. Diese Feststellung bildet den Inhalt des berühmten Gesetzes der multiplen Proportionen, der vielfachen Gewichtsverhältnisse: Die Gewichte von Elementen, die miteinander eine Verbindung eingehen, verhalten sich zueinander wie ganzzahlige Vielfache ihrer Atomgewichte.

Zu diesem Ergebnis kam Dalton in den Jahren 1804 und 1805. Im Jahre 1808 erschien dann sein berühmtes Buch »Ein neues System der chemischen Philosophie«, das eine neue Epoche in der Wissenschaft einleitete. Seine Schlußfolgerungen überprüfte sofort der englische Arzt William Hyde Wollaston (1766—1828), jener Mann, der erstmals die dunklen Linien im Sonnenspektrum bemerkte, und überzeugte sich von ihrer Richtigkeit.

Uns fällt es heute schwer, jene Epoche zu verstehen,

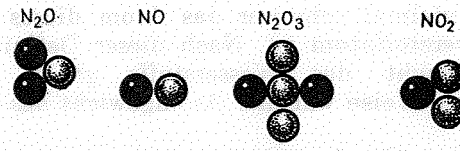

Abb. 22. Erklarung des Gesetzes der multiplen Proportionen mit Hilfe der Atome

in der man nicht nur die Atomhypothese ablehnte, sondern darüber hinaus selbst an der Konstanz der Zusammensetzung einer chemischen Verbindung zweifelte. Aus dieser Zeit ist der achtjährige Streit zwischen Joseph Louis Proust (1754—1826) und Claude Louis Berthollet (1748—1822) bekannt, an dessem Ende Proust schließlich bewies, daß unabhängig davon, wie und woher die chemische Verbindung erhalten wurde, sie immer eine unveränderliche Zusammensetzung besitzt. Wasser bleibt Wasser, ob es nun vom Himmel fällt, aus dem Fluß genommen oder durch die Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff gewonnen wird.

Nachdem dies geklärt war, konnte der nächste Schritt getan werden, die Bestimmung des Atomgewichts der Elemente. Dazu waren einfachste Stoffe auszuwählen. Zuerst wandte man sich den Gasen zu. Dabei machte der französische Wissenschaftler Louis-Joseph Gay-Lussac (1778—1850) eine sehr wichtige Entdeckung. Die Volumen zweier miteinander in Reaktion tretender Gase verhalten sich zueinander wie ganze Zahlen. Es handelt sich dabei also nicht um die Gewichte, sondern um die Volumen.

Wie wir bald sehen werden, ist dies sehr wichtig. Um z.B. bei einer Reaktion zwischen Sauerstoff- und Wasserstoffgas nur Wasser zu erhalten, müssen in einer Volumeneinheit Sauerstoff genau zwei Volumeneinheiten Wasserstoff verbrannt werden. Das führt zu der Schlußfolgerung, daß in gleichen Gasvolumen die gleiche Anzahl von Atomen enthalten ist.

Zu diesem Schluß kam im Jahre 1811 auch der italienische Wissenschaftler Amadeo Avogadro (1776—1856), nur formulierte er das Resultat genauer. Die Anzahl der Moleküle eines Gases bei gleichem Druck und gleicher Temperatur im gleichen Volumen ist gleich, unabhängig von seiner chemischen Beschaffenheit. Wie wir heute wissen, bestehen

die Moleküle der meisten Gase — Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff usw. — aus zwei Atomen, also H_2, O_2, N_2 usw. Das Verständnis des klassischen Versuchs zur Verbrennung von Wasserstoff in Sauerstoff bereitet nun keinerlei Schwierigkeiten mehr. Wir wissen, daß hierbei aus einer Volumeneinheit Sauerstoff und zwei Volumeneinheiten Wasserstoffgas zwei Volumeneinheiten Wasserdampf entstehen. In Kurzform kann man diesen Sachverhalt als Gleichung angeben: $2H_2+O_2=2H_2O$. Worin liegt die Bedeutung der Entdeckungen von Gay-Lussac und Avogadro, und weshalb haben wir diese einfachen Tatsachen so ausführlich besprochen?

Verfolgen wir nochmals den Gang der Überlegungen. Im gleichen Gasvolumen (bei gleichem Druck und gleicher Temperatur) ist die gleiche Anzahl von Molekülen enthalten. Bekannt ist, daß 2 g Wasserstoff bei Normaldruck und Zimmertemperatur ein Volumen von 22,4 l einnehmen. Wir wollen die Anzahl der Moleküle, die in diesem Volumen enthalten ist, mit N bezeichnen. Die gleiche Anzahl Sauerstoffmoleküle beansprucht ebenfalls das Volumen 22,4 l wiegt jedoch nicht 2 g, sondern 32 g. Daraus folgt, daß jedes Sauerstoffatom sechzehnmal schwerer als ein Wasserstoffatom ist. Dies wiederum bedeutet, daß wir durch Messung des spezifischen Gewichts eines beliebigen Gases (bestehend aus Molekülen eines Elements) zugleich auch sein Atomgewicht ermitteln.

Nirgendwo trat bisher die Realität der Atome so deutlich zutage wie hier. Das spezifische Gewicht ist eine leicht meßbare und auch durchaus gewohnte Größe, da sie direkt auf unsere Sinnesorgane einwirkt. Es ist verblüffend, daß sich durch die Messung des spezifischen Gewichts eines Gases sein Atomgewicht bestimmen läßt, eine Größe, die wir durch unsere Sinnesorgane nicht direkt in Erfahrung bringen können und die dennoch in Realität existiert.

Die Zahl der in 22,4 l eines beliebigen Gases enthaltenen Moleküle bezeichnet man heute als die Avogadrosche Zahl. Sie ist eine der fundamentalen Konstanten der Physik, wie etwa die Lichtgeschwindigkeit c oder die Plancksche Konstante h. Zu ihrer Ermittlung genügt die Kenntnis des absoluten Gewichtes M (genauer: der absoluten Masse) eines Wasserstoffatoms. Da in 22,4 l Wasserstoffgas genau 2 g Wasserstoffatome enthalten sind, ist die Avogadrosche Zahl $N=\frac{2}{M}$.

Eine erste Abschätzung der Zahl N gelang nach den Berechnungen Joseph Loschmidts (1821—1895), der das absolute Gewicht und die Größe des Wasserstoffatoms bestimmte. Übrigens folgte aus seinen Berechnungen, daß die Entfernung zwischen den Gasmolekülen etwa zehnmal größer ist, als die Moleküle selbst es sind. Hätte man dieses Ergebnis vorher gewußt, dann wäre Avogadros Hypothese ganz offenkundig gewesen. Die mittleren Abstände zwischen den Gasatomen hängen nicht von deren Ausmaßen ab, da diese sich von Gasart zu Gasart nur ganz geringfügig ändern.

Avogadros Hypothese geriet jedoch bald in Vergessenheit. Zu jener Zeit aber gab es zwischen den Chemikern keinerlei Übereinstimmung. Fast jeder anerkannte nur seine eigene Atomgewichtstabelle. Die Vertreter der organischen Chemie mißtrauten denen der anorganischen Chemie. Erst nachdem 1853 der italienische Wissenschaftler Stanislao Cannizzaro (1826—1910) die Avogadrosche Hypothese wieder in Erinnerung gebracht hatte, konnte man an die Klassifizierung der Elemente gehen. Die Schrift Cannizzaros war auch der Anstoß für die Arbeiten des deutschen Chemikers Lothar Meyer (1830—1895), der — unabhängig von Mendelejew — einen bedeutenden Beitrag zur Aufstellung des Periodensystems der Elemente geleistet hat.

Das periodische System der Elemente

Man könnte meinen, nichts sei einfacher als die Aufstellung des periodischen Systems der Elemente, muß man doch nur sämtliche Elemente nach steigendem Atomgewicht ordnen, um die Periodizität ihrer Eigenschaften offenkundig werden zu lassen.

Die Entdeckungsgeschichte des Periodensystems der Elemente wird häufig so berichtet, als habe Mendelejew alle damals bekannten Elemente auf die Rückseite von Visitenkarten geschrieben und diese so lange aneinandergelegt, bis er schließlich am 1. März 1869 eine sinnvolle Ordnung fand. Dabei darf man aber nicht vergessen, wie viele schlaflose Nächte und rastlose Tage des fruchtlosen Nachdenkens vorangegangen waren, während denen das Problem völlig aussichtslos erschien. Worin bestand die Schwierigkeit der Aufgabe? Die chemischen Elemente sind verschiedenfarbige, feste, flüssige oder gasförmige Stoffe.

Wir wissen nur, daß man jedem Element eine Zahl, das Atomgewicht, zuordnen kann. Diese Zahl wurde zunächst als Ausgangspunkt für ihre Klassifizierung genommen. Gewiß lassen sich alle Elemente nach wachsendem Atomgewicht ordnen, und viele Wissenschaftler verfuhren in der Tat so. Dieses Verfahren ist jedoch reine Handwerkelei, solange man nicht weiß, ob alle Elemente bekannt sind.

Dieses Problem erinnert an jenes bekannte Kinderspiel, bei dem Teile eines Bildes auf Würfel geklebt sind und diese Würfel nun so zusammengelegt werden müssen, daß man wieder das ganze Bild erhält. Nun stellen wir uns vor, daß ein Teil der Würfel verlorengegangen ist, während die Bildteile auf anderen Würfeln verzerrt oder verfälscht sind. Auch in diesem Fall läßt sich das ganze Bild rekonstruieren, wenn auch natürlich mit größerer Mühe. Allerdings muß man nun versuchen, sich das Bild insgesamt vorzustellen, und darf nicht hoffen, daß es von selbst entsteht, wenn man die Würfel nur willkürlich und ohne nachzudenken immer wieder umstellt. Dmitri Iwanowitsch Mendelejew (1834—1907) besaß die Gabe des »synthetischen« Denkens. Er stellte sich die Elemente von vornherein nicht einfach als zufällige Stoffe, sondern als Teile eines einheitlichen Systems vor. Bei seiner Suche nach diesem System der Elemente beschränkte er sich nicht allein auf deren physikalische Eigenschaft, also ihre Atomgewichte (obwohl er diese Eigenschaft seiner Klassifizierung zugrunde gelegt hatte), sondern er behielt auch stets alle übrigen chemischen Eigenschaften der Elemente im Auge, verglich und kombinierte sie miteinander.

Zu Mendelejews Zeiten waren 63 Elemente bekannt.In der Tabelle, die er im Jahre 1869 aufstellte, gehorchten nur 36 von ihnen dem Prinzip des wachsenden Atomgewichts. Für 20 Elemente wurde dieses Prinzip verletzt, und für die verbleibenden 7 korrigierte Mendelejew die Atomgewichte entsprechend seiner Tabelle. Er war von der Richtigkeit seines Systems so überzeugt, daß er auf dessen Grundlage die Eigenschaften noch nicht entdeckter Elemente voraussagte und die entsprechenden Plätze dafür in seiner Tabelle freihielt. Tatsächlich wurden diese Elemente auch bald darauf entdeckt: Skandium mit der Ordnungszahl 21 im Jahre 1875, Gallium mit der Ordnungszahl 31 im Jahre 1879, Germanium mit der Ordnungszahl 32 im Jahre 1886 und Rhenium mit der Ordnungszahl 75

im Jahre 1925. Technetium mit der Ordnungszahl 43 wurde erst 1937 synthetisiert.

Streng genommen hat Mendelejew sein System eigentlich nicht auf der Grundlage von Fakten entdeckt, sondern entgegen diesen Fakten. Es scheint uns heute so, als habe er die gesamte Tabelle bereits vor Augen gehabt und nur jene Eigenschaften der Elemente berücksichtigt, die ihr nicht zuwiderliefen. Mendelejew besaß die seltene Gabe einer großen Intuition, die es ihm erlaubte, die Wahrheit durch das »Gestrüpp« falscher Fakten hindurch zu erblicken.

Mit dem periodischen System der Elemente nach Mendelejew fand nun endlich auch der alte Streit zwischen den Anhängern des Aristoteles und des Demokrit über die Natur der Elemente seinen Abschluß. Längs der Zeilen der Tabelle ändert sich die nicht direkt beobachtbare Eigenschaft des Demokritschen Atoms, das Atomgewicht (also eine Quantität). Die Gruppen von Elementen mit analogen chemischen Eigenschaften (Wertigkeit, Reaktionsfähigkeit usw.) ordnen sich jeweils in vertikaler Richtung der Tabelle ein. Diese Eigenschaften sind beobachtbar, da wir sie mit Hilfe unserer Sinnesorgane wahrnehmen können. Sie zeigen eine gewisse Verwandtschaft mit den Aristotelischen »Qualitäten«.

Die Entdeckung des Periodensystems der Elemente sichert Mendelejew einen festen Platz in der Geschichte der Wissenschaft.

Gedächtnisstütze oder fundamentales Naturgesetz?

Bei der Betrachtung der Mendelejewschen Tabelle entsteht die Frage: »Stellt sie ein bequemes Verfahren dar, sich die Elemente einzuprägen, oder ist sie Ausdruck einer fundamentalen Gesetzmäßigkeit in der Natur?« Dem sachkundigen Blick des Chemikers sagt das periodische System sehr viel, doch wir sind hier außerstande, in allen Einzelheiten darauf einzugehen. Wir wollen versuchen, nur das Wichtigste begreiflich zu machen. Wenn dem periodischen System wirklich ein Naturgesetz zugrunde liegt, dann muß eine Antwort auf folgende Fragen gefunden werden:
Was bestimmt die Reihenfolge der Elemente im periodischen System?
Worin liegt die Ursache der Periodizität ihrer Eigenschaften?
Wovon hängt die Länge der Perioden ab?

Ein halbes Jahrhundert lang — von Mendelejew bis Pauli — bemühte man sich um eine befriedigende Antwort. Erst nach der Schaffung der Atomtheorie war man in der Lage, das periodische System der Elemente zu erklären.

Bereits Mendelejew wußte, daß das Atomgewicht die Stellung der Elemente innerhalb des periodischen Systems nur näherungsweise definiert. Trotzdem war er imstande, nach einem nur ihm allein bekannten Verfahren die Elemente »richtig« im System anzuordnen. Die Numerierung in dieser Reihenfolge bereitete dann natürlich keine Schwierigkeiten mehr. Aber hat diese Numerierung nicht einen tieferen Sinn?

Mit dem gleichen Erfolg können Sie die Würfel mit den Bildausschnitten so numerieren, daß es immer möglich ist, schnell das Gesamtbild herzustellen. Ein solches Verfahren ist natürlich bequem, doch einen tieferen Sinn besitzt es nicht, da die Nummern auf den Würfeln in keiner inneren Beziehung stehen zu dem, was auf den Würfeln abgebildet ist.

Existiert eine innere Beziehung zwischen den chemischen Eigenschaften eines Elementes und seiner Ordnungszahl im periodischen System, oder handelt es sich bei der Ordnungszahl nur um ein willkürliches Merkmal von der Art der Hausnummern in einer Straße? Wenn es wirklich so wäre, dann hätte man mit der Entdeckung jedes neuen Elementes auch die gesamte Numerierung ändern müssen. Aber in der über hundertjährigen Geschichte des periodischen Systems brauchte die Numerierung der Elemente kein einziges Mal geändert zu werden.

Eine Erklärung für diese Stabilität konnte erst nach den Arbeiten Rutherfords gefunden werden. Im Jahre 1911, als Rutherford sein Atommoder vellöffentlichte, sprach der Holländer Antoonius van den Broek (1870—1926) folgende Annahme aus: Die Ordnungszahl eines Elementes im periodischen System nach Mendelejew ist gleich der Ladung seines Atomkerns.

Zwei Jahre später bewies einer der besten Schüler Rutherfords, Henry Gwyn Jeffrey Moseley (1887—1915), diese Hypothese bei der Untersuchung der Röntgenspektren verschiedener Elemente. Moseleys Arbeit wurde selbst in jenen entdeckungsreichen Jahren zu einem Hauptereignis in der Physik.

Worin besteht das Wesen und die Bedeutung seiner

Entdeckung? Mit ihr wird nachgewiesen, daß die Elemente im periodischen System richtig angeordnet sind und daß noch diejenigen Elemente zu entdecken sind, für die es freie Plätze im periodischen System gibt. Nach Moseleys Arbeiten fand das System der chemischen Elemente seine endgültige Bestätigung, und man brauchte nun nur noch in seine Besonderheiten einzudringen.

Wollen wir das Atom wirklich erkennen, dann müssen wir zunächst zu seinem Kern vorstoßen, denn der Kern bestimmt die Struktur der Atome und alle beobachtbaren Eigenschaften der Elemente, die aus diesen Atomen bestehen. Aber die Ladung des Atomkerns wird durch die Elektronenhülle verborgen; sie kann mit keinerlei chemischen und auch mit der Mehrzahl der physikalischen Methoden nicht gemessen werden. So kam man dieser Atomeigenschaft erst dann auf die Spur, als man begann, die Atome mit »Geschossen« wie den Alphateilchen zu beschießen.

Auf Grund bestimmter Gesetzmäßigkeiten, die wir zur Zeit noch nicht kennen, ist die Ladung des Kerns etwa halb so groß wie das Atomgewicht. Ordnen wir die Elemente nach steigendem Atomgewicht an, dann erhalten wir damit auch eine mehr oder weniger zutreffende Anordnung nach wachsender Kernladungszahl.

Mendelejew wußte natürlich nichts von der Existenz der Atomkerne, doch er ahnte, daß die Atome noch eine andere Eigenschaft besitzen, die eine tiefer liegende Ursache hat als das Atomgewicht. Als er die Elemente in seiner Tabelle anordnete, vertraute er seiner Intuition mehr als den Atomgewichten. Es ist, als ob er unter die Elektronenhülle der Atome geschaut habe, um dort die positiven Ladungen im Kern zu zählen und diese Zahl dann unter der Bezeichnung Ordnungszahl dem jeweiligen Element beizugeben. Die Ordnungszahl ist ein inneres Merkmal des Elementes (Anzahl der Kernladungen) und läßt sich daher nicht willkürlich von uns festlegen wie etwa die Nummer eines Hauses.

Nun können wir auch eine exakte Definition des Elementes geben: Ein Element ist ein Stoff, der aus Atomen mit gleicher Kernladungszahl besteht.

Bleibt schließlich noch die Frage zu klären: Warum führt die stetige Änderung der Kernladungszahl der Atome zu einer periodischen Änderung ihrer chemischen Eigen-

schaften? Ergänzend sei bemerkt, daß sich mit der Erhöhung der Kernladungszahl nicht nur die chemischen, sondern auch die physikalischen Eigenschaften wie das spezifische Gewicht, die Festigkeit oder sogar der Aggregatzustand ändern. Die Elemente mit den Ordnungszahlen 2, 10, 18 und 36 sind die Gase Helium, Neon, Argon und Krypton, die wegen ihres äußerst geringen Reaktionsvermögens die Bezeichnung Edelgase erhalten haben. Erhöht man die Kernladungszahl dieser Atome nur um eine Einheit, dann erhält man die Elemente 3, 11, 19 und 37, also die Alkalimetalle Lithium, Natrium, Kalium und Rubidium, die den in der Tabelle unmittelbar benachbarten Edelgasen weder in ihren physikalischen noch in ihren chemischen Eigenschaften ähneln. Natrium und Kalium beispielsweise sind so reaktionsfreudig, daß man sie nicht an der Luft aufbewahren kann, da sie sich hier von selbst entzünden.

Die Ursache der periodischen Änderung der Eigenschaften der Elemente muß also offenbar nicht im Kern, sondern in der diesen umgebenden Elektronenhülle zu suchen sein. Hier ergibt sich zunächst der Gedanke, daß die Elektronen nicht willkürlich um den Kern angeordnet sind, sondern in Form von schichtenartigen Hüllen, von bestimmten Schalen. Der Beginn der Auffüllung einer Schale mit Elektronen fällt mit dem Beginn einer neuen Periode zusammen, und gerade hierbei ändern sich die chemischen Eigenschaften der Elemente sprunghaft. Es war Niels Bohr, der diesen Gedanken zum ersten Mal ausgesprochen hat.

Die bisherigen Betrachtungen zeigen jedoch noch kein Verfahren zur Berechnung der Periodenlänge. Auf den ersten Blick ändert sich die Länge der Perioden in der Tabelle recht willkürlich. In der ersten Periode haben wir zwei Elemente, in der zweiten und dritten Periode acht und in der vierten und fünften Periode 18, während es in der sechsten Periode schließlich 32 Elemente sind. Bereits 1906 hatte Johann Rydberg bemerkt, daß die Zahlenreihe 2, 8, 18, 32 sich durch die einfache Formel $2n^2$ ($n=1, 2, 3, 4$) beschreiben läßt. Diese Gesetzmäßigkeit hatte Pauli erst im Jahre 1924 nach der Entdeckung des bekannten Pauliverbots erklären können.

Die Bewegung des Elektrons wird durch vier Quantenzahlen charakterisiert, die wir ebenfalls im vorigen Kapitel ausführlich behandelten und die wir uns an dieser Stelle daher nur kurz in das Gedächtnis zurückrufen wollen:

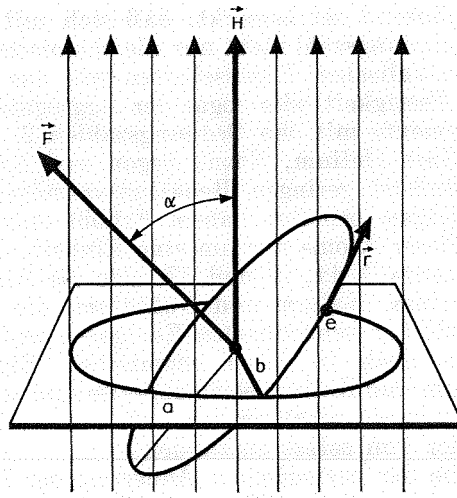

Abb. 23. Charakterisierung einer Elektronenbahn durch die 4 Quantenzahlen (e=Elektron, $\vec{H}$=magnetische Feldstärke, $\vec{F}$=Senkrechte auf der Ellipse, a=große Halbachse, b=kleine Halbachse)

n — Hauptquantenzahl, kann die Werte, 1, 2, 3,... annehmen;

l — Nebenquantenzahl, die bei gegebenen n die Werte 0, 1, 2,..., $(n-1)$ annimmt;

m — magnetische Quantenzahl; durchläuft bei gegebenen n und l die Werte $-l$, $-(l-1)$,..., -1, 0, 1,... $(l-1)$, l, d.h. insgesamt $2l+1$ Werte;

S — Spinquantenzahl, nimmt die Werte $+\frac{1}{2}$ und $-\frac{1}{2}$ an.

Das Pauliverbot lautet: Im Atom können keine Elektronen existieren, die die gleichen Quantenzahlen besitzen.

Daher läßt sich auf einer Schale mit der Hauptquantenzahl n nur eine begrenzte Anzahl Elektronen unterbringen. Auf der ersten Schale ($n=1$) können sich z.B. nur 2 Elektronen befinden. Ist die Hauptquantenzahl $n=1$, so darf der Drehimpuls nur den einen Wert $l=0$ annehmen. Folglich ist auch die magnetische Quantenzahl $m=0$. Der Spin des Elektrons hängt von keiner anderen Quantenzahl ab und kann daher zwei Werte annehmen: $S=\frac{1}{2}$ und $S=-\frac{1}{2}$.

Demzufolge finden wir nur zwei Elektronen auf der ersten Schale vor; sie besitzen die Quantenzahlen ($n=1$; $l=0$; $S=\frac{1}{2}$) und ($n=1$; $l=0$; $m=0$; $S=-\frac{1}{2}$). Mit Hilfe analoger Überlegungen überzeugt man sich schnell davon, daß auf der zweiten Schale nur 8 Elektronen, auf der dritten nur 18 und allgemein auf der Schale mit der Hauptquantenzahl n nur $2n^2$ Elektronen vorhanden sein können. Somit bestimmt die maximal zulässige Anzahl der Elektronen auf den einzelnen Elektronenschalen, charakterisiert durch die Hauptquantenzahl n die Länge der Perioden im Mendelejewschen System.

Um sich den Grund für das Auftreten dieser Zahlen anschaulicher klarzumachen, stellen wir uns vor, daß wir die Aufgabe bekommen, ein Wohngebiet zu besiedeln, das n Häuser mit den Nummern $l=0, 1, 2,\ldots$ $(n-1)$ umfaßt, wobei sich in jedem Haus mit der Nummer l nur $(2l+1)$ Wohnungen befinden. Wenn es uns nicht erlaubt ist, jede Wohnung mit mehr als zwei Bewohnern zu besetzen, so können wir im Wohngebiet nur $2n^2$ Menschen unterbringen.

Jede Periode des periodischen Systems beginnt mit einem Alkalimetall und endet mit einem Edelgas. Die chemischen Eigenschaften dieser Elemente unterscheiden sich sehr stark voneinander. Nunmehr ist es jedoch leicht, den Grund für ihr derart unterschiedliches Verhalten zu verstehen. Die Edelgase — Helium, Neon, Argon usw. — unterscheiden sich von allen anderen Elementen dadurch, daß sie vollkommen aufgefüllte Schalen besitzen.

Die Atome der Alkalimetalle Lithium, Natrium, Kalium usw., die im periodischen System direkt nach den Edelgasen kommen, enthalten ein Elektron in der nächsthöheren Schale, die auf die jeweilige aufgefüllte Schale folgt. Diese einzelnen Elektronen sind mit dem Kern viel schwächer verbunden als die anderen Elektronen des Atoms. Daher verlieren die Atome der Alkalimetalle die äußeren Elektronen leicht und werden zu positiv geladenen Ionen Li^+, Na^+, K^+ usw.

Umgekehrt fehlt in den Atomen von Fluor, Chlor, Brom usw. nur ein Elektron, damit die äußere Schale abgeschlossen wäre. Sie nehmen daher leicht ein Elektron auf und bilden dann die negativen Ionen F^-, Cl^-, Br^- usw. Treffen ein Natriumatom und ein Chloratom zusammen, so bilden sich die Ionen Na^+ und Cl^-. Diese Ionen ziehen sich gegen-

seitig auf Grund ihrer verschiedenen Ladungen an und bilden das Molekül NaCl, d.h. das Kochsalzmolekül.

Wir sehen an dem letzteren Beispiel, daß es uns ohne Mühe gelingt, den Begriff der Wertigkeit eines chemischen Elements zu erklären: Die Wertigkeit eines Elements in einer Verbindung ist gleich der Anzahl der Elektronen seiner Atome, die an der Bildung der Verbindung beteiligt sind. Man sieht nun leicht, daß sich die Wertigkeit zusammen mit anderen chemischen Eigenschaften nach 2, 8, 18, 32 Elementen, d.h. jeweils zu Beginn der Auffüllung einer neuen Schale, periodisch wiederholen muß.

Im vergangenen Jahrhundert riefen die Zahlen 2, 8, 18, 32 Erstaunen hervor, und man nannte sie »magische« Zahlen. Man versuchte, sie auf verschiedene Weise zu erklären. So erinnerte man sich unter anderem daran, daß das Oktaeder das stabilste Vieleck ist und daß es in der buddhistischen Philosophie eine Lehre über die acht Wege zum Guten gibt. Doch kaum jemand nahm an, daß es für diese Zahlen eine einfache und rationale Erklärung gibt.

Wenn Dalton, Lavoisier, Mendelejew sowie alle, die seinerzeit ihr Leben und ihre Kraft dem Studium der chemischen Elemente und der Aufstellung eines Systems dieser Elemente widmeten, die heutigen Ergebnisse auf diesem Gebiet sehen könnten, dann wären sie sicher sehr glücklich darüber, welche Klarheit hier schließlich erreicht worden ist. Anstelle einer zufälligen Anordnung von Stoffen, von denen man oftmals gar nicht wußte, ob sie Elemente oder Verbindungen darstellen, würden sie heute eine klar begründete Ordnung von Atomen erblicken.

Diese Ergebnisse verdanken wir letztlich der Quantenmechanik, mit der wir uns nun bekannt machen wollen.

Rund um das Quant

Atome, Kerne, Isotope

Wenn jemand die Absicht hätte, alle Atome anzufertigen, so wäre es für ihn am einfachsten, den Weg einzuschlagen, den seinerzeit Prout empfahl, nämlich alle Atome aus Wasserstoffatomen aufzubauen.

Dabei ist allerdings von vornherein klar, daß sich zwei Wasserstoffkerne (Protonen) bei der Annäherung gegenseitig abstoßen. Deshalb hat die Natur noch eine dritte Art

von Partikeln, die Neutronen, »erfunden«, die gemeinsam mit den Protonen zur Bildung stabiler Kerne befähigt sind.

Die Ladung eines Neutrons ist gleich Null, und seine Masse entspricht fast exakt der Protonenmasse. Bringt man zwei Protonen und zwei Neutronen zusammen, dann bilden sie den stabilen Heliumkern — das sind jene Alphateilchen, die Rutherford bei seinen Versuchen benutzte. Es ist offensichtlich, daß ein Heliumatom viermal schwerer als ein Wasserstoffatom ist und daß sein Atomgewicht deshalb gleich 4 sein muß. Die beiden Heliumelektronen besetzen die niedrigste Schale mit den Quantenzahlen $n=1$, $l=0$, $m=0$, $s=-\frac{1}{2}$.

Fügt man dem Heliumkern ein weiteres Proton hinzu, dann erhalten wir einen Lithiumkern mit dem Atomgewicht 6. Das dritte Elektron findet beim Lithium allerdings keinen Platz mehr auf der ersten Schale und gelangt daher auf die folgende Schale mit der Hauptquantenzahl $n=2$. Diese Tatsache entspricht genau dem Umstand, daß mit dem Lithium eine neue Periode im periodischen System beginnt. Auf der Schale $n=2$ finden $2n^2=8$ Elektronen Platz (zwei Elektronen auf der Bahn $n=2$, $l=0$ und 6 Elektronen auf den Bahnen $n=2$, $l=1$ und $m=-1, 0, 1$). Indem man dem Lithiumkern allmählich Protonen und Neutronen zuführt und der Lithiumhülle die entsprechende Anzahl von Elektronen, läßt sich auf diese Weise die gesamte zweite Periode aufbauen, vom Lithium bis zum Neon.

Hierbei stoßen wir allerdings auf eine neue Erscheinung. Wir wissen zwar genau, daß wir zum Lithiumkern 5 Protonen hinzufügen müssen, um einen Sauerstoffkern zu erhalten, da die Ladung des Lithiumkerns gleich 3 und die Ladung des Sauerstoffkerns gleich 8 ist. Wieviel Neutronen müssen dabei jedoch ergänzt werden? Wie sich zeigt, sind es manchmal 5 und manchmal 7 Elektronen. Infolgedessen entspricht das Atomgewicht des Sauerstoffs manchmal 16 und manchmal 18. Was verstehen wir dabei unter dem Begriff »Sauerstoff«? Heute wissen wir, daß es sich um ein natürliches Gemisch der beiden Sauerstoffisotope mit den Atomgewichten 16 und 18 handelt, das irgendwann einmal in der Natur entstanden ist und sich mit keinerlei chemischen Verfahren trennen läßt, da die chemischen Eigenschaften der Elemente nicht von deren

Atomgewicht, sondern nur von der Kernladung ihrer Atome sowie den Besonderheiten der Struktur ihrer Elektronenschalen abhängig sind. (Erst jetzt vermögen wir die Leistung Mendelejews ganz zu würdigen, der den Begriff Atomgewicht respektvoll, aber mit großer Vorsicht gebrauchte und bei der Anordnung der Elemente in seinem System der eigenen Intuition mehr vertraute als der natürlichen Reihenfolge der Atomgewichte.)

Den Begriff Isotope führte Frederic Soddy (1877—1956) im Jahre 1912 ein. Das aus dem Griechischen stammende Wort bedeutet »das den gleichen Platz Einnehmende« (gemeint ist hier der gleiche Platz im periodischen System der Elemente). Es zeigte sich, daß in der Natur von jedem Element mehrere Isotope existieren, gelegentlich sogar sehr viele; der Wasserstoff beispielsweise besitzt drei (Wasserstoff, Deuterium und Tritium), das Eisen auch drei.

Die meisten Isotope kommen bei Zinn und Blei vor: 26 Isotope. Insgesamt gibt es in der Natur mehr als eineinhalb Tausend Isotope der verschiedenen Elemente.

Nach der Entdeckung der Isotope unterschied man zwischen einem »Reinelement« und einem »Isotopengemisch.«

Ein »Reinelement« ist ein Stoff, der nur aus einer Atomart besteht, d. h. aus Atomen mit gleicher Masse und gleicher Kernladungszahl. Zur Bezeichnung eines derartigen Elements wählt man z.B. folgende Kurzform: $^{16}_{8}0$. Dies bedeutet: Sauerstoff mit der Kernladungszahl 8 und dem Atomgewicht 16. Ein »Isotopengemisch« oder — was das gleiche ist — ein gewöhnliches chemisches Element ist das natürliche Gemisch solcher »Reinelemente«.

Mit der Entdeckung der Isotope entstand ein neues Problem: Wie sollten jetzt die Atomgewichte gemessen werden? Welches Element sollte als Vergleichselement dienen? Dabei zeigte sich, daß das Wasserstoffatom als Vergleichselement unbequem war, und seit 1961 dient ein Zwölftel der Masse des Kohlenstoffisotops $^{12}_{6}C$ als Einheit des Atomgewichts.

Dank der Arbeiten von Francis William Aston (1877 bis 1945) und vieler anderer sind wir heute imstande, Atomgewichte sehr genau zu messen. Das Atomgewicht des Wasserstoffs beträgt in der Kohlenstoffskala 1,00782522.

Ob es sich um ein »Reinelement« oder ein »Isotopengemisch« handelt, ist in der Chemie selbst mit den feinsten Analysenverfahren nicht zu unterscheiden. Um so weniger vermögen dies die menschlichen Sinnesorgane. Trotzdem wird dieser Unterschied zuweilen für alle sichtbar und für viele sogar tödlich. Die Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki haben den Unterschied zwischen harmlosen Uranisotopen und dem Isotop $^{235}_{92}U$, das in der ersten Atombombe enthalten war, auf die entsetzlichste Weise zu spüren bekommen.

Atome und Menschen

Unter den Gelehrten, die an der Schaffung des periodischen Systems mitwirkten, gab es sehr viele interessante Persönlichkeiten. Zu ihnen gehörte Robert Boyle (1627 bis 1691). Er war ein außergewöhnlicher Mensch. Entscheidenden Einfluß übte die Philosophie von Francis Bacon (1561bis 1626) auf ihn aus, vor allem dessen Lehre vom Experiment als dem wichtigsten Kriterium der Wahrheit. Vielleicht war das der Grund dafür, daß Boyle als einer der ersten ein quantitatives Gesetz in der Physik aufstellte, das heute unter dem Namen Boyle-Mariottesches Gasgesetz bekannt ist. Interessant ist, daß Boyles Arbeitsstil dem unserer Epoche näher steht als demjenigen seiner Zeit. Er schrieb seine Arbeiten nicht selbst, sondern diktierte sie einem Sekretär, und er führte selbst auch keine Versuche durch, sondern beauftragte damit seinen Assistenten, mit dem er übrigens Glück hatte, denn das war kein Geringerer als der später berühmte Robert Hooke (1635—1703).

Auch John Dalton (1766—1844) gehörte zu denen, die die Atomtheorie wesentlich bereicherten. Er führte ein ruhiges, bescheidenes Leben. Sein Tagesablauf änderte sich nie. Die Nachbarn wußten auf die Minute genau, wann er morgens aus dem Hause trat, um die Anzeige seines Thermometers und seines Barometers zu notieren. Daltons Arbeitstag endete stets um 21.00 Uhr.

Dalton las fast überhaupt nichts, und er rühmte sich, daß »er seine ganze Bibliothek auf dem Rücken tragen könne und selbst von diesen Büchern nicht einmal die Hälfte gelesen habe«. »Wie bei allen Autodidakten war auch bei ihm wenig der Wunsch entwickelt, das zu wis-

sen, was andere getan hatten, als vielmehr die feste Überzeugung von der Richtigkeit dessen, was er selbst entdeckte«, schrieb einer seiner Biographen über ihn.

Seine Zeitgenossen schilderten Daltons Eigenschaften in düsteren Farben. Humphry Davys Bruder erinnerte sich später: »Sein Aussehen und seine Manieren waren abstoßend... Seine Stimme klang schneidend und streitsüchtig, und sein Gang war ebenso plump wie ungestüm.«

Etwa den gleichen Eindruck hatten auch die Mitglieder der Philosophischen Gesellschaft Manchester von ihm, die ihn seiner wissenschaftlichen Verdienste wegen dennoch im Jahre 1817 zu ihrem Präsidenten wählten. Am Ende seines Lebens war er allgemein anerkannt: 1822 wurde er zum Mitglied der Royal Society gewählt und 1830 zu einem der acht ausländischen Mitglieder der damaligen Pariser Akademie der Wissenschaften, an der er damit den Platz des ein Jahr zuvor verstorbenen Humphry Davy einnahm.

Wie stets in solchen Fällen sind den späteren Generationen die menschlichen Unzulänglichkeiten eines Wissenschaftlers völlig gleichgültig. Man erinnert sich nur an seine wissenschaftlichen Leistungen.

Zu den Bahnbrechern der Atomhypothese gehörte auch Antoonius van den Broek (1870—1926). Er war von Beruf Jurist. In seiner Freizeit befaßte er sich mit den Naturwissenschaften. Aber auch in anderer Hinsicht war er eine bemerkenswerte Persönlichkeit. Er interessierte sich zutiefst für die Naturwissenschaften, konnte jedoch wissenschaftliche Versammlungen und Diskussionen nicht ausstehen. Seine Lebensauffassung hatte ihn zu einem Vegetarier werden lassen, und seine Kleidung gehörte ganz eindeutig zu einer anderen Epoche.

Als man Rutherford von der Hypothese van den Broeks berichtete, bemerkte er erregt, daß nur ein Amateur sich den Spaß erlauben könne, ohne hinreichende Begründung einen ganzen Haufen von Vermutungen auf einmal auszusprechen. Diese feindselige Haltung behielt Rutherford lange Zeit bei, und er zeigte sich noch viele Jahre später stets sehr ungehalten, wenn sich Bohr in seinen Arbeiten über die Atomtheorie auf van den Broek berief.

Die Matrizen Heisenbergs

Es werden nicht mehr sehr viele Jahre vergehen, bis eines Tages Kosmonauten auch den Mars betreten. Sie werden einige Tonnen belichteten Filmmaterials und verschiedene Gesteinsproben zur Erde zurückbringen. Doch nicht darin liegt die entscheidende Bedeutung ihres Fluges, denn alles das hätten auch Roboter erledigen können. Die Kosmonauten werden viele neue Eindrücke gewonnen haben. Es wird ihnen sehr schwerfallen, diese Eindrücke in Worte zu kleiden, weil es keine Worte gibt, die all dem genau entsprechen, was sie in den fernen Regionen erlebt und erfahren haben.

An der Überwindung dieser Schwierigkeiten werden sie allerdings bereits während ihres langen Rückfluges arbeiten. Bei der Besprechung ihrer Eindrücke werden sie nämlich gezwungen sein, neue Worte oder ungewöhnliche Wortkombinationen zu finden, weil sie sonst außerstande wären, sich zu verständigen.

Die wirklichen Schwierigkeiten werden aber erst später, nach der Rückkehr auf die Erde, einsetzen, dann nämlich, wenn sie den Mitbürgern von ihren Eindrücken und Erlebnissen berichten wollen. Wer nicht selbst an der Expedition teilgenommen hat, wird den Worten der Rückkehrer den Sinn beimessen, den ihn die »irdischen Verhältnisse« gelehrt haben. Es wird eine geraume Zeit verstreichen, bis die Zuhörer die neue Begriffe beherrschen und ihnen die gleiche Bedeutung zusprechen wie die Kosmonauten.

So ist es überall. Die Bedeutung von Wörtern ergibt sich aus Tradition und Gewohnheit, und doch wird ihr wahrer Sinn erst aus dem Kontext klar. Neue Erscheinungen oder neue Erkenntnisse werden mit Hilfe des bekannten Wortgutes beschrieben und erläutert. Man legt jedoch den alten Wörtern einen anderen, völlig neuen Sinn unter, den man erst richtig zu begreifen vermag, wenn man den neuen Sachverhalt ganz verstanden hat.

Die Bemühungen, die alte und neue Bedeutung voneinander abzugrenzen, führen häufig zur Herausbildung eines Jargons in der Wissenschaft, der allerdings oft auch Anlaß zu Mißverständnissen ist.

Um die Jahrhundertwende entdeckten die Physiker eine neue Welt, die Welt des Atoms. Überwältigt von dem Reichtum neuer Erscheinungen, Formen und Gesetzmäßigkeiten, suchten sie nach ordnenden Gedanken. Sie fanden bald neue Bezeichnungen, ohne jedoch zunächst ganz zu begreifen, welcher Sinn ihnen untergelegt werden müsse. In ihrem Streben nach Eindeutigkeit verloren manche Physiker das Vertrauen zu den Worten gänzlich, und sie erkannten nur noch mathematische Gleichungen an. Es war die Zeit der »Irrungen und Wirrungen» in der Physik, obwohl gerade damals die wichtigsten Fakten der Atomwissenschaft gewonnen wurden. Wir wollen versuchen, die richtigen Worte zu finden, um korrekt über diese Tatsachen berichten zu können.

Wir hatten unsere Darlegung über die Quantenmechanik mit einer Definition begonnen: »Die Quantenmechanik ist die Wissenschaft von der Struktur und den Eigenschaften atomarer Objekte und Erscheinungen.« Dabei hatte sich sogleich herausgestellt, daß wir nicht imstande waren, den Begriff »Atom« zu definieren. Ganz eindeutig können wir das auch jetzt noch nicht, obwohl wir nun bereits wesentlich mehr darüber wissen als am Anfang der Lektüre. Bisher haben wir ausführlich den Weg verfolgt, auf dem die spekulativen Vorstellungen unter dem Einfluß der Experimente durch ein komplizierteres, weniger anschauliches, dafür aber realeres Bild des Atoms abgelöst wurden.

Zu Beginn unseres Jahrhunderts glaubte bereits niemand mehr an Atome als feste Kügelchen, und von den ursprünglichen Vorstellungen Demokrits war nur die einzige Idee erhalten geblieben: In der Natur existiert eine Teilbarkeitsgrenze für die Materie, bei deren Überschreitung sie in eine neue Qualität übergeht.

Die Wissenschaftler bewiesen allmählich, daß das Atom wirklich existiert, daß es aber dem Atom Demokrits ganz und gar nicht ähnelt. Sie erforschten, daß es aus dem Kern und den Elektronen besteht, daß es imstande ist, Strahlen zu emittieren und daß die Strahlung mit der Elektronenbewegung im Atom verknüpft ist. Nun mußten die Gesetze

für diese Bewegung gefunden werden. Die Lösung des Problems erbrachte die Quantenmechanik.

Den ersten Schritt dazu unternahm Niels Bohr. Er hatte als erster klar erkannt, daß die Plancksche Konstante h keine einprägsame Hypothese darstellt, mit deren Hilfe man das Spektrum des schwarzen Körpers erklären kann, sondern eine physikalische Realität, die bei der Erklärung aller atomaren Erscheinungen berücksichtigt werden muß. Auf der Grundlage dieser Idee formulierte er seine berühmten Postulate über den stationären Zustand und den Quantensprung. Bohrs Postulate widersprachen der gesamten früheren Physik, brachten jedoch unerwartet Ordnung in das ursprüngliche Chaos der neuen, experimentell gesicherten Tatsachen.

Die Wissenschaft schenkt Autoritäten keinen Glauben, auch wenn sie Niels Bohr heißen. Darum stand das Problem, die Bohrschen Postulate entweder zu verwerfen oder ihre Widersprüche zu beseitigen. Wie diese Aufgabe gelöst wurde und wie es gelang, eine folgerichtige Theorie der atomaren Erscheinungen zu konstruieren, davon soll im folgenden die Rede sein.

Mit den Augen der Zeitgenossen gesehen

Im Jahre 1949 sagte Albert Einstein, als er sich an die Entstehungsepoche der Quantenmechanik erinnerte, daß seine Versuche, die theoretischen Grundlagen den neuen Ergebnissen anzupassen, ein völliges Fiasko erlitten. Es schien, als hätte man allen Boden unter den Füßen verloren und als gäbe es weit und breit keinen festen Grund, auf dem man hätte bauen können. Und gerade aus diesem Grunde sei es ihm wie ein Wunder erschienen, daß diese schwankenden und widerspruchsvollen Grundlagen ausreichten, damit Niels Bohr, den er als einen Menschen mit genialer Intuition und hochentwickeltem Spürsinn bezeichnete, die Hauptgesetze der Spektrallinien und der Elektronenhüllen der Atome sowie ihre Bedeutung für die Chemie finden konnte. Die außerordentliche Eleganz der Bohrschen Entdeckung veranlaßte Einstein zu der Bemerkung, dies sei höchste Musikalität im Bereich des Denkens.

Gewiß, aus historischer Sicht ist es stets leichter und sicherer, die Bedeutung von Entdeckungen zu würdigen. Die Zeitgenossen hatten es sehr viel schwerer. Sie wußten

einfach noch zu wenig, um die Vorzüge der neuen Theorie von ihren Mängeln zu unterscheiden. Bohrs Zeitgenossen waren von seiner Theorie trotz ihrer Erfolge zutiefst unbefriedigt. Ihre Äußerungen hierüber sind für uns aufschlußreich.

»Wenn das richtig ist, so bedeutet es das Ende der Physik als Wissenschaft», sagte Albert Einstein im Jahre 1913. Und D. S. Roshdestwenski schrieb im Jahre 1919: »Das Atom existiert ewig, dies wissen wir ohne Zweifel. Aber verstehen wir es? Nein, wir verstehen es nicht. Unser Unverständnis verbergen wir hinter den ebenfalls unverständlichen Quantenbedingungen. Der Prozeß der Strahlungsemission ist ein Akt der Wiedergeburt des zerstörten Atoms. Sein Mechanismus ist uns unverständlich. Wiederum verbergen wir unser Unverständnis hinter einer unverständlichen Quantenbedingung, der zweiten Bohrschen Hypothese... Diese ganze Bohrsche Methode beruht auf der Quantisierung, einem völlig blinden und wenig logischen Denkprozeß, auf — wenn man sich so ausdrücken darf — formaler Intuition.«

Im Jahre 1920 stelle H. A. Kramers fest, daß die Quantentheorie anderen Siegen in der Wissenschaft ähnlich sei: »Einige Monate lächelt sie uns freundlich zu, während wir danach jahrelang bittere Tränen vergießen.«

Und nur wenig später (1922) sagte P. Epstein: »Die Quantelungsgesetze in ihrer gegenwärtigen Formulierung tragen in gewissem Grad theologischen Charakter. Für einen Naturwissenschaftler sind sie gänzlich unannehmbar, da viele Wissenschaftler zu Recht über diese Bauernregel empört sind.« Ähnliche Bemerkungen findet man in einer weiteren Arbeit H. A. Kramers und H. Holsts aus dem Jahre 1923. Sie meinen, man sei unermeßlich weit von einer Beschreibung des Atommechanismus entfernt, der es uns gestatten würde, beispielsweise alle Bewegungen des Elektrons im Atom zu verfolgen oder die Rolle der stationären Zustände zu begreifen. Man könnte die Quantentheorie mit einer Arznei vergleichen, die die Krankheit heilt, den Patienten jedoch tötet.

Im Jahre 1925 meinte W. Pauli, daß die Physik wieder in eine Sackgasse geraten und jedenfalls für ihn einfach zu schwer sei. Er ziehe es deshalb vor, ein Filmkomiker oder irgend etwas Ähnliches zu sein, um nichts von Physik zu hören.

Selbst bei Bohr löste die damalige Situation »ein Gefühl der Schwermut und Hoffnungslosigkeit« aus.

Um die Ursache dieser Unzufriedenheit zu erkennen, muß man sich mit der inneren Logik der Naturwissenschaften zumindest in allgemeinen Zügen bekannt machen. Dies ist kein leichtes Unterfangen, doch für das Verständnis der Quantenmechanik ganz unerläßlich.

Der Unerfahrene sieht in einem Lehrbuch der Quantenmechanik vor allem eine Fülle von Formeln und Gleichungen. Er kann sich dann allerdings relativ rasch davon überzeugen, daß dies wohl ein notwendiger, aber keineswegs der schwierigste Teil der Wissenschaft vom Atom ist. Wesentlich schwerer fällt es, den »physikalischen Sinn« der Formeln zu begreifen. Man darf diese Schwierigkeiten jedoch nicht überschätzen. Da es sie gibt, sollte man sie aber stets im Auge behalten. Ihr Wesen besteht darin, daß viele Wörter, die uns geläufig sind, in der Quantenmechanik zwangsläufig nicht im herkömmlichen Sinn gebraucht werden können.

Erscheinung, Abbild, Begriff und Formel

Jegliche Erkenntnis der Natur beginnt mit Wahrnehmungen. Das Kind berührt sein Spielzeug mit der Hand, es hört die Stimme der Mutter, trinkt aus der Flasche usw. Von seinen ersten Lebenstagen an gelangt das Kind in eine Welt der Erscheinungen, die in ihm ihre entsprechenden Abbilder erzeugen. Hier und im folgenden wird unter Abbild soviel wie anschauliche Vorstellung verstanden im Gegensatz zum Begriff bzw. zur Theorie. Für diese Erscheinungen und deren Abbilder hat das Kind zunächst nicht einmal Namen, und erst allmählich beginnt es, die Wörter zu »erkennen«, die den Erscheinungen und Abbildern entsprechen. Es lernt verstehen, welche Abbilder sich hinter den Wörtern verbergen, die die anderen Menschen gebrauchen. So begreift das Kind, daß die gleichen Wörter bei verschiedenen Menschen unterschiedliche Vorstellungen hervorrufen, und schließlich kommt es zu der Einsicht, daß es bestimmte Wörter (oder Wortgruppen) gibt, die nicht unmittelbar mit Abbildern verknüpft sind, obwohl sie erst durch diese entstanden sind. Es sind die Begriffe.

Begriffe verallgemeinern die kollektive Erfahrung; sie verzichten auf Einzelheiten, die den konkreten Abbildern

eigen sind und dienen der Verständigung der Menschen untereinander.

Mit fortschreitender Entwicklung beginnt das Kind, in Begriffen zu denken, und schließlich begreift es, daß z.B. ein »hölzernes Pferd« nur eines unter dem »Spielzeug ist und daß das »Wasser« nicht unbedingt Meerwasser, Flußwasser oder Wasser aus der Wasserleitung sein muß, sondern eben Wasser schlechthin darstellt. Die Befähigung zur Abstraktion ist ein Merkmal des menschlichen Verstandes und auf jeden Fall notwendige Voraussetzung jeglicher Wissenschaft. Andernfalls gäbe es statt der Wissenschaft nur einen ungeordneten Wust von Fakten.

Freilich sind auch die Begriffe selbst nicht ganz eindeutig, weil sie u.a. bei verschiedenen Menschen unterschiedliche Vorstellungen wachrufen. Diese fehlende Eindeutigkeit kann selbst im Alltag zu Mißverständnissen führen. In der Wissenschaft dagegen ist derartiges weitaus gefährlicher, denn ihre Ergebnisse erheben ja Anspruch auf Objektivität; sie dürfen nicht von den Vorstellungen oder Meinungen einzelner Menschen abhängig sein. Darum wird jedem Begriff in der Wissenschaft eine Gruppe von Symbolen und Zeichen zugeordnet; außerdem sind streng definierte Vorschrifen für den Umgang mit diesen Symbolen und Zahlen angegeben. Damit wird jene Eindeutigkeit der Wissenschaft erreicht, die den Wissenschaftlern verschiedener Länder und Generationen die Verständigung untereinander erlaubt. Der Zusammenhang

Erscheinung → Abbild → Begriff → Formel

läßt sich schematisch auch am Beispiel der Entstehung des Begriffes Welle erklären.

Die beobachteten Erscheinungen sind unterschiedlich: die Wellen des Meeres oder die sich kreisförmig ausbreitenden Wellen, die ein in den Teich geworfener Stein an dessen Oberfläche entstehen läßt oder die Ausbreitung des Lichts und die Schwingungen einer Saite. Dabei entstehen bei den Beobachtern jeweils durchaus konkrete Abbilder. Allmählich bemerken sie, daß diese verschiedenen Erscheinungen etwas gemeinsam haben. Sie sind mit einem gewissen periodischen Prozeß verknüpft, dessen charakteristische Merkmale die Erscheinungen der Interferenz und der Beugung sind, über die wir bereits ausführlich gesprochen haben. So entsteht der neue Begriff Welle. Um diesen

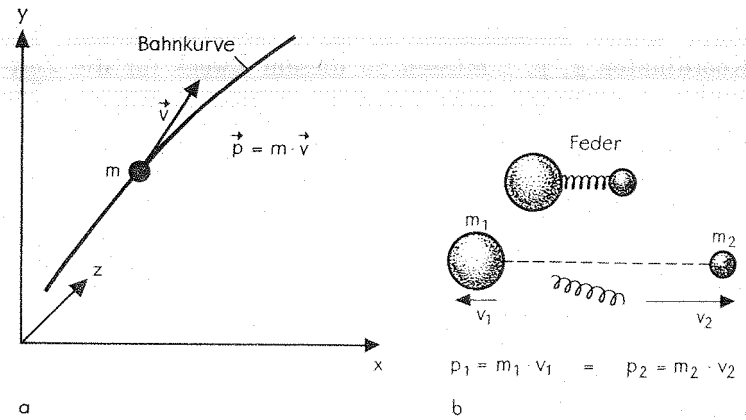

Abb. 24. Begriffe Bahnkurve und Impuls

Begriff eindeutig werden zu lassen, ordnet man ihm vier Parameter zu: die Amplitude A, die Ausbreitungsgeschwindigkeit v, die Wellenlänge λ und die Frequenz ν.

Ebenso setzt der Begriff Teilchen nicht voraus, daß dabei das konkrete Abbild einer Billardkugel, eines Staubkörnchens oder dergleichen entsteht. Für den Physiker genügt es zu wissen, daß eine Partikel ein gewisses Objekt ist, deren innere Struktur in diesem Zusammenhang nicht interessiert, die jedoch eine Masse m, eine Geschwindigkeit v, einen Impuls $p=mv$ und eine Bahnkurve besitzt, die sich verfolgen läßt.

Auch Bahnkurve ist ein neuer Begriff, den wir benutzen müssen, wenn wir den Begriff Bewegung eines Teilchens definieren. Auf den ersten Blick scheint das Ganze ein unendlicher Prozeß zu sein. Um einen Begriff zu definieren, muß man einen anderen Begriff verwenden, der seinerseits definiert werden muß usw. Das ist jedoch ein Trugschluß. In der Physik existieren einige Grundbegriffe, die sich ohne Bezugnahme auf andere definieren lassen. Sie kann man bestimmen, indem man die genauen Vorschriften für die Messung der Größen angibt, die diesen Begriffen entsprechen. Begriffe dieser Art sind die Zeit t, die Koordinaten x, y, z, die Ladung e und andere.

Die Bahnkurve eines Teilchens ist gegeben, wenn wir zu jedem Zeitpunt t die Lage des Teilchens im Raum in

Form seiner Koordinaten x, y, z angeben können. Die Koordinaten x, y, z müssen zu diesem Zweck für die Zeitpunkte t entweder gemessen oder berechnet werden. Die erste Aufgabe löst die Experimentalphysik, die zweite dagegen die theoretische Physik. Allerdings kann man das zweite Problem nur dann lösen, wenn man die physikalischen Gesetze kennt, nach denen sich das Teilchen bewegt.

Was ist ein physikalisches Gesetz? Es ist die stets gültige Beziehung zwischen Erscheinungen und physikalischen Größen, festgehalten mit Hilfe mathematischer Symbole in Form von Gleichungen. Für jede Gruppe von Erscheinungen existieren eigene Bewegungsgesetze. Die einen gelten in der Mechanik (die Newtonschen Gleichungen), andere dagegen in der Elektrodynamik (die Maxwellschen Gleichungen). Alle Begriffe und physikalischen Gesetze, die Formeln, durch die sie ausgedrückt werden, und die Folgerungen daraus bilden die Wissenschaft Physik.

Jede abgeschlossene Wissenschaft muß in sich logisch widerspruchsfrei sein. Dies bedeutet insbesondere, daß jeder Begriff innerhalb dieser Wissenschaft nur in einem einzigen genau definierten Sinn gebraucht werden darf. Dies zu erreichen ist schwer, da sich die Wissenschaftler wie alle Menschen schlechthin untereinander nicht mit Formeln, sondern mit Worten verständigen. Die Formeln brauchen sie nur zur eindeutigen Fixierung von Forschungsergebnissen.

Als Beispiel einer logisch abgeschlossenen Wissenschaft galt lange Zeit die Mechanik, die man ihrer Vollkommenheit wegen als klassische Mechanik bezeichnete. Die Mechanik ist die Wissenschaft von der Bewegung der Körper. Ihren Gesetzen gehorchen nahezu alle sichtbaren Bewegungen in der Natur, sei es nun das Flattern eines Schmetterlings oder die Bewegung der Planeten. Die klassische Vollkommenheit der Mechanik hat die Wissenschaftler lange Zeit geradezu hypnotisiert, und sie versuchten mit ihrer Hilfe nicht nur die mechanischen, sondern auch alle übrigen Bewegung in der Natur zu erklären.

Noch 1894, an der Schwelle des Umbruchs der Physik, schrieb Heinrich Hertz, daß alle einhellig der Auffassung seien, die Aufgabe der Physik bestehe darin, alle Naturerscheinungen den einfachen Gesetzen der Mechanik unterzuordnen.

Der Begriff Bewegung ist einer der kompliziertesten

Begriffe in der Physik überhaupt. Mit ihm verbindet unsere Vorstellungskraft ganz verschiedene Bilder vom fallenden Blatt bis zum dahinstürmenden Nashorn. Doch auch die phantasievollsten Bilder von einer Bewegung, die unserer Vorstellungskraft zugänglich sind, enthalten etwas Gemeinsames: die Lageänderung bestimmter Objekte relativ zu anderen in der Zeit. Nach Einführung des Begriffes Bahnkurve wird auch der Begriff Bewegung klarer und anschaulicher. Allerdings ist es jetzt eine Anschaulichkeit besonderer Art. Die mit dem Begriff Bahnkurve verbundene Vorstellung ähnelt weder dem fallenden Blatt noch dem Nashorn in irgendeiner Weise. Mehr noch, alle Anschaulichkeit, die mit dem Begriff Bahnkurve verknüpft ist, birgt Gefahren in sich. Die häufige Wiederholung der Wortverbindung »»Bahnkurve der Bewegung« führt dazu, daß man aufhört, beide Begriffe voneinander zu trennen, obwohl sie nur bei einer Bewegungsart, nämlich der mechanischen Bewegung, zusammengehören. Doch da der Mensch sich eine andere Bewegung als die mechanische nur schwer vorzustellen vermag, versucht er, auch alle anderen Bewegungsarten auf sie zurückzuführen. Natürlich gelingt dies nicht, wie schon das Beispiel der elektrischen Bewegungsformen zeigt. Gewiß kann man sich eine Hochspannungsleitung oder eine Telefonleitung vorstellen und dabei der Meinung sein, diese Leitungen seien die »Bahn« der elektrischen Signale. Freilich sind solche Vorstellungen nicht real. Die Wellen elektrischer Signale sind eben keine Flüssigkeit, die durch die Leiter fließt. Der Bewegungsbegriff in der Quantenmechanik ist noch komplizierter. Als es schließlich gelang, ihn widerspruchsfrei zu definieren, war die moderne Quantenmechanik geboren.

Die Heisenbergsche Mechanik des Atoms

Nachdem sich die erste Begeisterung über die Erfolge der Bohrschen Theorie gelegt hatte, erkannte man ihre Widersprüchlichkeit. Immer wieder überzeugten sich die Physiker davon, daß das Elektron bei seiner Bewegung im Atom den Gesetzen der Elektrodynamik nicht gehorcht: Es fällt weder in den Kern, noch emittiert es Strahlung, wenn es sich nicht in einem angeregten Zustand befindet. Dies alles war recht ungewöhnlich. Das Elektron als »Kind« der Elektrodynamik geriet plötzlich aus der Kontrolle und

gehorchte nicht mehr den Gesetzen der Elektrodynamik. Jeder Versuch, einen logischen Ausweg aus diesem Teufelskreis zu finden, führte die Wissenschaftler stets zu dem Schluß: Bohrs Atommodell kann nach den Gesetzen der Elektrodynamik nicht existieren.

Die weitere Entwicklung der Wissenschaft zeigte, daß die Bohrschen Postulate eine gelungene Vermutung über das Wirken damals noch unbekannter, fundamentaler Gesetze darstellten, die heute als Gesetze der Quantenmechanik bezeichnet werden.

Die Quantenmechanik ist die Wissenschaft von der Bewegung der Elektronen im Atom. Ursprünglich trug die Quantenmechanik auch die Bezeichung Atommechanik. Zu ihren Begründern gehört Werner Heisenberg.

Im Frühjahr 1925 kam Heisenberg, einer Einladung Bohrs folgend, aus München nach Kopenhagen. In München hatte er gerade erst unter der wissenschaftlichen Führung von Sommerfeld sein Universitätsstudium abgeschlossen. In Dänemark nun geriet er sogleich in eine Atmosphäre wissenschaftlichen Meinungsstreits. Ein halbes Jahr verging mit der Arbeit und vielen Diskussionen über ein einziges Thema: Warum gehorcht das Elektron — ein Objekt der Elektrodynamik — bei seiner Bewegung im Atom nicht den Gesetzen der Elektrodynamik, und worin liegt die Ursache für die erstaunliche Kraft der »unlogischen« Bohrschen Postulate? Was bedeutet in diesem Fall der Begriff »Bewegung«?

Im Juni desselben Jahres gelangte Heisenberg zu einer unerwarteten Erkenntnis. Man darf sich die Bewegung des Elektrons im Atom nicht als Bewegung einer äußerst kleinen, geladenen Kugel längs einer Bahnkurve vorstellen. Eine derartige Vorstellung verbietet sich deshalb, weil das Elektron kein Kügelchen, sondern etwas weitaus Komplizierteres ist, und die Bewegung dieses »Etwas« läßt sich auch keineswegs so einfach verfolgen wie etwa die Bewegung einer Billardkugel. Traf diese Vermutung zu, dann bedeuteten alle Versuche, die Bahnkurve des Elektrons im Atom zu bestimmen, nichts anderes als unsinnige Fragen an die Natur — ähnlich denen, die man im Altertum an sie richtete: Worauf ruht die Erde? Wo ist das Ende der Welt? Was ist bei ihr oben und unten?

Heisenberg behauptete, die Gleichungen, mit deren Hilfe wir die Bewegung des Elektrons im Atom beschreiben

wollen, dürfen keinerlei Größen enthalten, ausgenommen jene, die wir im Experiment messen können. Aus diesen Versuchen jedoch folgte, daß das Atom stabil ist, aus dem Kern und den Elektronen besteht und Strahlen aussendet, wenn man es aus seinem Gleichgewichtszustand bringt. Diese Strahlung besitzt eine bestimmte Wellenlänge und entsteht nach dem Bohrschen Modell beim Sprung des Elektrons von einer stationären Bahn auf eine andere. Dabei sagte Bohrs Theorie nichts darüber aus, was im Augenblick des Sprungs, d.h. »im Flug« von einem stationären Zustand zum anderen, mit dem Elektron geschieht. Alle Physiker, Heisenberg nicht ausgenommen, hatten versucht, gerade auf diese Frage eine Antwort zu finden. Erst jetzt wurde es Heisenberg klar: Das Elektron tritt nicht »zwischen« den stationären Zuständen auf. Eine solche Eigenschaft besitzt es einfach nicht!

Aber welche Eigenschaft hat das Elektron dann? Es mußte etwas geben, wofür Heisenberg zunächst selbst nicht einmal eine Bezeichnung hatte. Er war fest davon überzeugt, daß dieses »Etwas« nur davon abhängen durfte, wohin das Elektron springt und woher es kommt.

Ausgehend von den Gleichungen der Elektrodynamik hatten bislang die Physiker versucht, die hypothetische Bahnkurve des Elektrons im Atom zu ermitteln. Diese hängt stets von der Zeit ab und ist durch die unendliche Zahlenreihe x_1, x_2, x_3, ... gegeben, die die Lage des Elektrons zur Zeit t_1, t_2, t_3, ... angibt. Im Gegensatz dazu erklärte Heisenberg: Im Atom existiert keine Bahnkurve dieser Art, vielmehr gibt es statt einer stetigen Kurve $X(t)$ einen Satz diskreter Zahlen X_{nk}, deren Werte nur von den Nummern n und k des Anfangs- und des Endzustandes des Elektrons abhängen.

Diese wichtige und recht komplizierte Behauptung kann man durch eine einfache Analogie erklären. Stellen wir uns ein Schachbrett vor, auf dem eine Fliege umherkrabbelt. Wollen wir ihren Weg ganz genau verfolgen, so vermerken wir ihre Lage x auf dem Schachbrett zu jedem Zeitpunkt t. Mit Hilfe dieser Angaben könnten wir nun ohne Schwierigkeiten die Kurve $X(t)$ zeichnen, also die Bahnkurve der Bewegung der Fliege. Besteht hingegen für eine solche Genauigkeit keine Notwendigkeit, so genügt es, die Felder anzugeben, die die Fliege auf ihrem Weg aufgesucht hat. Auch dabei erhalten wir eine gewisse

Information über die Fortbewegung der Fliege, doch diese Beschreibung ist vom Standpunkt der klassischen Mechanik unvollständig.

Nun stellen Sie sich bitte vor, daß Sie an diesem Brett eine Partie Schach spielen und beispielsweise den traditionellen Zug e2 — e4 ausführen. Das Ergebnis des Zuges ist in diesem Fall ganz unabhängig davon, auf welchem Weg der Bauer gerückt wurde. Die Regeln des Schachspiels sind von den Gesetzen der Mechanik unabhängig und bedürfen darum des Begriffes Bahnkurve nicht.

Heisenberg erkannte, daß die »Regeln des Atomspieles« die Kenntnis der Bahnkurve ebenfalls nicht voraussetzen. So stellte er den Zustand des Atoms in der Art eines unendlich großen Schachbretts dar, auf dem in jedes Feld die Zahl X_{nk} eingetragen war. Natürlich hängen die Werte dieser Zahlen von der Lage des Feldes auf dem »Atombrett« ab. d.h. von der Nummer n der Zeile (Anfangszustand) und der Nummer k der Spalte (Endzustand), an deren Schnittpunkt die Zahl X_{nk} steht.

Niemand wundert sich darüber, daß man eine Schachpartie auch viele Jahre später noch wiederholen kann, wenn man sie einmal aufgeschrieben hat. Verständlicherweise werden wir dabei nicht erfahren, wie lange die Partie in Wirklichkeit dauerte, was die Spieler dabei empfanden und wie sie ihre Figuren im einzelnen bewegten. Doch dies hat auch keine Bedeutung, da wir uns doch nur für die Partie interessieren.

Genauso ist es, wenn wir die Zahlen X_{nk}, also die Aufzeichnung des »Atomspiels«, kennen; wir wissen dann über das Atom alles, was zur Vorhersage seiner beobachtbaren Eigenschaften erforderlich ist. Dies gilt beispielsweise für das Atomspektrum, die Anzahl und Geschwindigkeit der durch Ultraviolettstrahlung aus dem Elektron herausgeschlagenen Elektronen u.ä.

Man darf die Zahlen X_{nk} nicht als Koordinaten des Elektrons im Atom bezeichnen. Sie bilden einen Ersatz dafür oder stellen sie dar, wie man später sagte. Was diese Worte allerdings bedeuten, verstand zu Anfang auch Heisenberg noch nicht.

In der Tat hätte man ja statt der Zahlentabelle (X_{nk}) mit dem gleichen Erfolg jede beliebige Figur aufzeichnen können — vielleicht eine Blume —, um dann zu behaupten, daß die Bewegung des Elektrons im Atom damit dar-

gestellt werde. Mit Unterstützung Max Borns (1882—1970) und Pasqual Jordans (geb. 1902) gelang es jedoch, herauszufinden, daß die Zahlentabelle (X_{nk}) keine Tabelle schlechthin, sondern eine Matrix ist.

Was bedeutet dieses Wort? Die Mathematik operiert mit Größen und Symbolen, und jedes Symbol unterliegt bestimmten Regeln. Einfache Zahlen beispielsweise dürfen addiert und multipliziert werden, wobei das Ergebnis dieser Operationen nicht davon abhängt, in welcher Reihenfolge wir sie durchführen: $5+3=3+5$ und $5 \cdot 3=3 \cdot 5$.

In der Mathematik gibt es allerdings auch kompliziertere Objekte, so die komplexen Zahlen, die Matrizen u.a. Die Matrizen sind Tabellen von Größen der Art (X_{nk}), für die ganz bestimmte Regeln für die Addition und Multiplikation gelten.

So hängt das Resultat der Multiplikation zweier Matrizen davon ab, in welcher Reihenfolge sie multipliziert werden:

$$\{X_{nk}\} \cdot \{P_{nk}\} \quad \{P_{nk}\} \cdot \{X_{nk}\}.$$

Natürlich hatten die Mathematiker lange vor Heisenberg bereits Matrizen gekannt, und sie verstanden auch damit umzugehen. Völlig unerwartet war indessen, daß diese merkwürdigen Objekte mit ihren so ungewohnten Eigenschaften in der Welt atomarer Erscheinungen real existierten.

Heisenbergs und Borns Verdienst besteht gerade darin, daß sie die »psychologische Barriere« überwanden und die Übereinstimmung zwischen den Eigenschaften der Matrizen und den Besonderheiten der Elektronenbewegung im Atom fanden. Damit begründeten sie eine neue Mechanik, die man als Atommechanik, Quantenmechanik oder auch Matrizenmechanik bezeichnet.

Die neue Mechanik heißt Quantenmechanik, weil in ihr bei der Beschreibung physikalischer Prozesse das Wirkungsquant h die entscheidende Rolle spielt. Wenn wir von der Quantenmechanik des Atoms sprechen, so beschränken wir uns bei unseren Betrachtungen immer auf die Bewegung der Elektronen im Atom.

Oftmals wird die von Heisenberg entwickelte Quantenmechanik auch Matrizenmechanik genannt, weil der ihr zugrunde liegende mathematische Apparat der Matrizenkalkül (die Matrizenrechnung) ist.

In der neuen Mechanik wird jeder Charakteristik des Elektrons — der Koordinate x, dem Impuls p, der Energie E — eine entsprechende Matrix zugeschrieben: (X_{nk}), $\{P_{nk}\}$ und $\{E_{nk}\}$.

Für diese Matrizen (und nicht für Zahlen!) werden die Bewegungsgleichungen aufgeschrieben, die uns aus der klassischen Mechanik bekannt sind. Danach muß man nur noch beachten, daß bei allen weiteren Operationen mit den Größen $\{X_{nk}\}$, $\{P_{nk}\}$, $\{E_{nk}\}$ die mathematischen Regeln für die Matrizenrechnung nicht verletzt werden.

Heisenberg stellte darüber hinaus noch den wichtigen Fakt fest: Die quantenmechanischen Matrizen für die Koordinate $\{X_{nk}\}$ und den Impuls $\{P_{nk}\}$ des Elektrons sind nicht beliebige Matrizen, sondern solche, die folgenden Vertauschungsregeln genügen:

$$\{X_{nk}\} \cdot \{P_{nk}\} - \{P_{nk}\} \cdot \{X_{nk}\} = i\hbar,$$

wobei $i = \sqrt{-1}$ ist
und $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ darstellt.

In der neuen Mechanik spielte diese Vertauschungsregel dieselbe Rolle wie die Bohrsche Quantelungsbedingung in der alten Atomtheorie. Sonderten die Bohrschen Bedingungen in der alten Theorie die stationären Bahnen aus der Menge aller anderen heraus, die nach den Gesetzen der klassischen Mechanik möglich waren, so sorgte jetzt die Heisenbergsche Vertauschungsregel dafür, daß von allen möglichen Matrizen nur die quantenmechanischen ausgewählt wurden.

Es ist kein Zufall, daß sowohl in den Bohrschen Quantelungsbedingungen als auch in den Heisenbergschen Gleichungen die Plancksche Konstante h vorkommt. Wie wir später noch sehen werden, geht die Plancksche Konstante immer notwendig in alle Gleichungen der Quantenmechanik ein. Man kann die quantenmechanischen Gleichungen allein durch diese Tatsache von allen anderen Gleichungen eindeutig unterscheiden.

Die neuen Gleichungen, die Heisenberg fand, ähnelten weder den Gleichungen der klassischen Mechanik noch denen der Maxwellschen Elektrodynamik und konnten daher auf keine Weise gegen sie verstoßen. Vom Stand-

punkt dieser neuen Gleichungen war der Zustand des Atoms vollständig gegeben, wenn die Matrix $\{X_{nk}\}$ oder die Matrix $\{P_{nk}\}$ bekannt war. Hierbei besitzen diese Matrizen eine solche Struktur, daß das Atom im nichtangeregten Zustand kein Licht ausstrahlt.

Richten wir unsere Aufmerksamkeit jetzt auf folgenden wichtigen Fakt: In unsere Diskussion über die Heisenbergsche Matrizenmechanik haben wir an keiner Stelle den Begriff »Bewegung des Elektrons« benutzt. Er ist in der neuen Mechanik einfach nicht nötig. Nach Heisenberg ist die Bewegung des Elektrons keine Verschiebung einer »Elektronenkugel« entlang irgendeiner Bahnkurve um den Kern.

Die Bewegung ist die Änderung des Zustandes des Systems in der Zeit, der durch die Matrizen $\{X_{nk}\}$ und $\{P_{nk}\}$ beschrieben wird.

Zusammen mit den Fragen über den Charakter der Bewegung des Elektrons im Atom entfällt nun auch die Frage über die Stabilität des Atoms. Vom Standpunkt der Quantenmechanik aus gesehen, befindet sich das nichtangeregte Atom im Zustand der Ruhe und braucht daher kein Licht abzustrahlen.

Die Heisenbergsche Theorie war in sich widerspruchsfrei, eine Eigenschaft, an der es der alten Bohrschen Theorie mangelte. Darüber hinaus lieferte die Quantenmechanik dieselben Resultate wie die Bohrsche Theorie. Weiterhin gelang es der neuen Theorie, zu zeigen, daß sich die Plancksche Hypothese über die Quantelung der Strahlung $E=h\nu$ als eine einfache und natürliche Schlußfolgerung aus ihr ergibt.

Um den Hintergrund der quantenmechanischen Theorie zu begreifen, muß man unbedingt den dafür notwendigen mathematischen Apparat, die Matrizenrechnung, beherrschen, d.h. mit dem Handwerkszeug eines Physikers vertraut sein.

Die Matrizen stellen keine mystischen oder schwer zu handhabenden Objekte dar. Die Matrizenrechnung läßt sich viel leichter aneignen als z.B. die lateinische Sprache. Dennoch muß man sich dafür Zeit lassen und diese Frage speziell studieren. Deswegen können wir uns in diesem Rahmen damit nicht mit der gebotenen Gründlichkeit beschäftigen. Auf eine oberflächliche Behandlung wollen wir verzichten, denn sie nutzt niemandem, sondern bewirkt

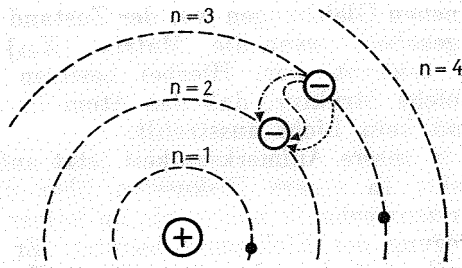

Abb. 25. Der Begriff der Bahnkurve ist in der Quantenmechanik nicht sinnvoll

nur, das physikalische Verständnis, das ohne Formeln und Rechnungen möglich ist, zu verwirren, anstatt es zu vertiefen.

Die Heisenbergsche Matrizenmechanik wurde von den Physikern allgemein mit großer Erleichterung aufgenommen. So erklärte Wolfgang Pauli im Jahre 1925, daß ihm die Heisenbergsche Mechanik die Lebensfreude und die Hoffnung wiedergegeben habe. Und wenn sie auch keine Lösung des Rätsels liefere, so sei er doch davon überzeugt, daß man nun weiter vorankommen könne. Diese Überzeugung vermochte er nach kurzer Zeit selbst zu bestätigen. Er wandte die neue Mechanik auf das Wasserstoffatom an und erhielt die gleichen Formeln wie Niels Bohr mit seiner Theorie. Natürlich traten hierbei neue Schwierigkeiten auf, doch waren dies Wachstumsschwierigkeiten und keine Sackgassen für die wissenschaftliche Entwicklung.

Rund um das Quant

Das Fundament der Physik

Die fundamentalen Begriffe der Physik wie Länge, Zeit, Masse, Ladung usw. lassen sich aus zwei Gründen nicht mit Worten eindeutig definieren: Erstens handelt es sich hierbei um Primärbegriffe, die nicht auf noch einfachere zurückgeführt werden könnten, und zweitens ist die Physik eine quantitative Wissenschaft, weshalb ihren Begriffen gleichzeitig auch Zahlen zugeordnet werden können. Es gibt nur eine Methode, solche Begriffe eindeutig werden

zu lassen: die Angabe der genauen Vorschrift zur Messung der Größen, denen sie entsprechen.

Den Begriff »Länge« haben wir bereits definiert: Ein Meter (1 m) ist die Länge, in der 1 650 763,73 Wellenlängen der orangefarbenen Spektrallinie von Kr-86 (d.h. des Kryptonisotops mit der Massenzahl 86) im Vakuum Platz finden. Die hier zugrunde gelegte Spektrallinie entspricht einem Elektronenübergang vom Niveau $5d$ auf das Niveau $2p$. Das so definierte Meter entspricht näherungsweise dem vierzigmillionsten Teil des Pariser Meridians, der ursprünglich (1799) als Längeneinheit festgelegt worden ist.

Die Einheit der Masse, das Kilogramm, ist definiert als die Masse eines Platin-Iridium-Zylinders, der 1789 angefertig worden ist, mit einer Höhe von 39 mm und einem Durchmesser von 39 mm. Diese Masse entspricht ungefähr der Masse von einem Liter destilliertem Wasser bei 4°C.

Zur Definition der Zeiteinheit muß ein stabiler periodischer Prozeß, beispielsweise die Rotation der Erde um die Sonne, benutzt werden. Eine Sekunde (1 s) ist der 31 556 925,9747ste Teil des tropischen Jahres, das gleich dem Zeitintervall zwischen zwei gleichen Stellungen der Erde bezüglich der Fixsterne ist. Wegen der Präzession der Erdachse und anderen Störungen ändert sich die Dauer des tropischen Jahres um 0,5 s in 100 Jahren: deshalb wurde zunächst festgelegt, daß die Dauer des Jahres 1900 die Grundlage für die Definition der Zeiteinheit bildet. Später überzeugte man sich jedoch davon, daß es günstiger wäre, die Zeiteinheit ebenso wie die Längeneinheit auf der Grundlage spektroskopischer Messungen zu definieren, da in der Spektroskopie die größten Genauigkeiten erreicht werden. Im Jahre 1967 gab die XIII. Generalkonferenz für Maß und Gewicht eine neue Definition der Sekunde: Eine Sekunde ist die Dauer von 9 192 631 770 Perioden der Strahlung, die dem Elektronenübergang zwischen den beiden hyperfeinen Niveaus des Grundzustandes von Zäsium 133 entspricht.

Der Übergang zu atomaren Standards für die Festlegung der Zeit- und Längeneinheit war nicht nur deshalb unvermeidlich, weil die Spektroskopie die genaueste physikalische Disziplin darstellt. Die atomaren Standards sind zudem außergewöhnlich stabil. Sie hängen weder vom Druck noch von der Temperatur ab, und selbst kosmische

Katastrophen haben auf sie keinen Einfluß. Das »Urmeter« hingegen wird unter einer Glashaube bei konstanter Temperatur sowie unter Beachtung einer Reihe weiterer Vorsichtsmaßnahmen aufbewahrt. Noch ungenauer war die Festlegung der Dauer einer Sekunde. In der Tat genügte der unerwartete Durchgang eines Himmelskörpers durch das Sonnensystem, um eine irreversible Änderung der Umlaufzeit der Erde um die Sonne hervorzurufen; damit würde sich auch die Dauer einer Sekunde ändern. Dagegen sind die atomaren Standards stabil und unveränderlich wie das Atom selbst, auf dessen Eigenschaften sie beruhen.

Die drei Größen Meter (m), Kilogramm (kg) und Sekunde (s) bilden einen Teil des technischen Maßsystems und reichen zur Beschreibung aller mechanischen Bewegungen aus. Die Elektrodynamik fordert noch die Messung zweier zusätzlicher fundamentaler Größen, der Ladung e und der Lichtgeschwindigkeit c. Zur Beschreibung atomarer Erscheinungen ist es erforderlich, außer den bereits aufgezählten Größen noch die Plancksche Konstante h zu kennen.

Zur genauen Bestimmung der fundamentalen physikalischen Konstanten wurde im Jahre 1875 ein Internationales Büro für Maß und Gewicht (Bureau International des Poids et Mesures) gegründet, das alle sechs Jahre Generalkonferenzen für Maß und Gewicht (Conférence Générale des Poids et Mesures) einberuft. Auf diesen Tagungen werden alle Einzelheiten, die bei einer Messung eine Rolle spielen, genau untersucht und entsprechende Vereinbarungen getroffen (SI-Einheiten: SI ist die Abkürzung für »Système International d'Unités«).

Halten wir eine wichtige Besonderheit derartiger Messungen fest. Nur selten gelingt es, eine physikalische Größe unabhängig von anderen physikalischen Größen zu bestimmen. Für die Messung der übrigen Größen muß man die physikalischen Gesetze benutzen. Wenn z.B. die Geschwindigkeit v eines Teilchens konstant ist, kann man sie bestimmen, indem man die Entfernung Δx mißt, die das Teilchen in der Zeit Δt durchlaufen hat:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} .$$

Dies ist ein einfaches Beispiel dafür, daß alle fundamentalen physikalischen Konstanten irgendwie miteinander ver-

bunden sind. Es gibt ein spezielles und recht kompliziertes Teilgebiet der Physik, dessen Aufgabe darin besteht, die Gesamtheit dieser Konstanten unter Berücksichtigung aller Angaben über ihre Messung widerspruchsfrei zu bestimmen. Doch die schwierigste Frage bestand darin, daß die Anwendbarkeitsgrenzen der so definierten Begriffe ermittelt werden mußten.

Die Maßeinheiten Meter, Kilogramm und Sekunde wurden so gewählt, daß sie gut vorstellbar sind. Werden diese Begriffe jedoch ihren früheren Sinn auch beim Übergang zu sehr großen und sehr kleinen Entfernungen, Massen und Zeitintervallen behalten? Vorläufig gibt es noch keine allgemeingültige Antwort auf diese Frage. Wir konnten uns bereits davon überzeugen, daß der Begriff der räumlichen Ausdehnung im Sinne einer Abmessung für das Elektron bereits nicht mehr anwendbar ist. In der Atomtheorie, in der man den Begriff Bewegung ändern mußte, haben die bisherigen Begriffe Länge, Masse und Zeit nach wie vor ihre Gültigkeit behalten. Dies bedeutet zumindest, daß man Entfernungen von 10^{-10} m, Massen von 10^{-27} kg und Zeitintervalle von 10^{-17} s noch immer im gewohnten Sinn auffassen darf.

Ein analoges Problem entsteht auch in der Astronomie bei dem Versuch, die ungeheuren Entfernungen der Galaxien und ihre Massen zu begreifen. Wahrscheinlich ist dieses Problem hier sogar schwieriger als in der Theorie der Elementarteilchen, denn wohl niemand vermag zu behaupten, daß er die Worte »eine Milliarde Lichtjahre« wirklich ganz versteht. Formal ist alles natürlich einfach: Dies ist die Entfernung, die der Lichtstrahl in 10^9 Jahren zurücklegt, d.h. eine Entfernung von $10^9 \cdot 3{,}15 \cdot 10^7 \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{m/s} = 10^{25}$ m. Doch wie kann man sich eine Vorstellung davon machen, was sich hinter diesem Symbol verbirgt? Zum Vergleich erinnern wir daran, das der Abstand zwischen Erde und Sonne $1{,}5 \cdot 10^{11}$ m beträgt, die der Lichtstrahl in »nur« 8 Minuten überwindet. Bis zum nächsten Fixstern, dem Alpha-Centauri, braucht der Lichtstrahl 4,35 Jahre und bis zum Zentrum unserer Galaxis 30 000 Jahre.

Nichts als Wellen

In der Wissenschaft vom Atom begann im Jahre 1925 eine neue Etappe ihrer Entwicklung. Im Verlaufe von drei Jahren entstand und erblühte eine neue Wissenschaft — die Quantenmechanik. Seitdem hat sich an den Grundlagen dieser Wissenschaft nur sehr wenig verändert. In ihrer Entstehung erinnert die Quantenmechanik an die Geburt einer vulkanischen Insel im Ozean: Sie erscheint urplötzlich, um sich dann im Verlaufe von Jahrhunderten nicht zu ändern. Überraschend ist die Entstehung der vulkanischen Inseln im Ozean jedoch nur für den, der die unterirdischen Erdbeben auf dem Meeresboden nicht beachtete. Im ersten Teil unseres Buches versuchten wir, diese tieferliegenden und kaum bemerkbaren Erschütterungen der Grundlagen der Physik wahrzunehmen und die verborgenen Bewegungen zu verfolgen, die zum Durchbruch der Quantenmechanik führten. Der Aufschwung in der Physik trat in dem Augenblick ein, als Werner Heisenberg die Vorurteile durchbrach, die den alten Vorstellungen innewohnten, dem Begriff der Bewegung einen neuen Sinn gab und auf dieser Grundlage eine neue Mechanik schuf, die Matrizenmechanik. Die Heisenbergsche Theorie war die erste konsequente Atomtheorie, die erfolgreich die Stabilität des Atoms erklären konnte, wonach man so lange Zeit vergeblich gesucht hatte. Nur vier Monate später entwickelte Erwin Schrödinger eine weitere Mechanik — die Wellenmechanik. Sie vermochte ebenfalls die Eigenschaften des Atoms zu erklären, war aber der Matrizenmechanik Heisenbergs überhaupt nicht ähnlich.

Im weiteren werden wir erfahren, daß sowohl die Matrizenmechanik als auch die Wellenmechanik nichts anderes sind als verschiedene Schreibweisen einer einheitlichen Quantenmechanik — der Lehre vom Bau der Atome. Doch bevor wir dies verstehen können, müssen wir mit dem Wesen der Wellenmechanik vertraut werden und uns die im Grunde einfachen Ideen aneignen, aus denen sie erwuchs.

Die Idee von Louis de Broglie

Louis-Victor de Broglie wurde 1892 geboren. Nach dem ersten Weltkrieg begann er im Laboratorium seines älteren Bruders, Maurice de Broglie, zu arbeiten. Sein Bruder untersuchte die Röntgenspektren verschiedener Elemente. Daher waren Niels Bohrs Arbeiten in seinem Laboratorium wohlbekannt.

Wie viele andere zeitgenössische Physiker beschäftigten auch Louis de Broglie die Fragen: Warum sind die Atome stabil? Warum sendet das Elektron auf den stationären Bahnen keine elektromagnetischen Wellen aus?

Das erste Bohrsche Postulat hob diese Bahnen aus der Gesamtheit aller denkbaren Bahnen durch die Quantisierungsbedingung heraus, die den Radius r der Bahn des Elektrons, die Geschwindigkeit v und die Masse m des Elektrons mit einem ganzzahligen Vielfachen des durch 2π geteilten Wirkungsquants h verband:

$$mvr = n \cdot \frac{h}{2\pi}.$$

De Broglie wollte eine vernünftige Begründung für diese Bedingung finden, d.h., er strebte danach, sie mit Hilfe anderer, aber gewohnter Begriffe zu erklären.

Wenn man eine Erklärung für unverständliche Fakten sucht, so greift man in der Regel immer zu Analogien. Genauso ging auch de Broglie bei seiner Suche vor, einen Ausweg aus der Sackgasse sich einander widersprechender Vorstellungen zu finden. So kam er auf den Einfall, daß diese Schwierigkeiten denen verwandt sein müßten, die sich bei den Versuchen zur Erklärung der widersprüchlichen Eigenschaften des Lichtes ergeben hatten.

Die physikalischen Vorstellungen über das Licht hatten sich im Jahre 1923 endgültig verwirrt, als Arthur Holly Compton (1892—1962) seinen berühmten Versuch durchführte und bewies, daß die Streuung von Röntgenstrahlen an Elektronen überhaupt keine Ähnlichkeit mit der Brechung von Meereswellen an einer Mole besitzt. Dafür aber erinnerte sie an den Zusammenprall zweier Billardkugeln, von denen die eine ein Elektron der Masse m und die andere ein Lichtquant mit der Energie $E=h\nu$ darstellt. Nach Comptons Versuch konnte niemand mehr daran zweifeln, daß in der Natur wirklich Lichtquanten existieren, deren

Energie $E=h\nu$ eindeutig mit der Wellenlänge des Lichtes $\lambda=\frac{c}{\nu}$ verbunden ist, der diese Quanten entsprechen. Seit dem Jahre 1926 nennt man diese Lichtquanten Photonen.

Weder de Broglie noch seine Zeitgenossen konnten erklären, was der Satz bedeutet: »Lichtquanten entsprechen Lichtwellen.« Sie hatten jedoch keine Anhaltspunkte dafür, die experimentellen Fakten in Zweifel zu ziehen, aus denen eindeutig folgte, daß sich ein Lichtstrahl unter bestimmten Bedingungen wie eine Welle der Länge λ und der Frequenz $\nu=\frac{c}{\lambda}$ verhält und unter anderen Bedingungen dagegen wie ein Teilchenstrom — Photonenstrom — mit der Energie $E=h\nu$ und dem Impuls $p=\frac{h\nu}{c}$.

Erst vier Jahre nach Comptons Versuch konnten die Physiker begreifen, daß diese Erscheinungen nur ein Ausnahmefall des allgemeinen Welle-Teilchen-Dualismus in der Natur ist. De Broglie mußte demzufolge den richtigen Weg intuitiv finden.

Materiewellen

De Broglie war — wie alle bedeutenden Wissenschaftler — zutiefst von der Einheit der Natur überzeugt. Darum konnte er sich nicht damit abfinden, daß das Verhalten des Lichtstrahls irgend etwas Besonderes und Einmaliges ist, das in der Natur nicht seinesgleichen hat. So kam de Broglie zu der Annahme, daß nicht nur der Lichtstrahl, sondern alle Körper in der Natur gleichzeitig sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften besitzen müssen. Daher müssen in der Natur außer Lichtwellen und Teilchen ebenso Lichtquanten und Materiewellen real existieren.

Um diese einfache und aussagekräftige Behauptung aufzustellen, bedurfte es großer Kühnheit und fester Überzeugung. Noch schwieriger aber war es, sie zu verstehen. Das erforderte einen unvoreingenommenen, an abstraktes Denken gewöhnten Verstand. Sehr schwer vorstellbar war auch ein anderes: Die Natur, die der Wahrnehmung durch unsere Sinnesorgane direkt zugänglich ist, sollte keine sichtbaren Bilder geschaffen haben, die uns bei unserer Mühe eine Hilfe sein könnten. In der Tat: Mit dem Wort Teilchen verbinden wir verschiedene Vorstellungen, z.B. ein Sand-

korn, eine Billardkugel oder einen Stein. Niemals aber werden wir bei diesem Wort an Meereswellen oder an eine schwingende Saite denken. Für einen normalen Menschen sind diese Dinge so entgegengesetzter Natur, daß es unsinnig erscheint, sie als zwei Erscheinungen ein und derselben Sache aufzufassen.

Jede Schilderung von der Entstehung einer neuen physikalischen Theorie ist mit Sicherheit ungenau, selbst wenn sie von deren Schöpfer stammt. Sie verwendet zumeist Begriffe, die es zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Theorie noch gar nicht gab. So ruft der Begriff »Materiewellen« bei einem heutigen Physiker die Vorstellung von einer komplizierten Erscheinung in der Welt der Atome wach, die sich mit nichts aus unserer täglichen Erfahrung vergleichen läßt. Erst allmählich — im Umgang mit den Formeln der Quantenmechanik und bei der Lösung kernphysikalischer Probleme — wird der Physiker mit dem Begriff »Materiewelle« vertraut. Im Jahre 1922 konnte de Broglie natürlich diese Gesetzmäßigkeiten nicht kennen. (Sie wurden erst gesucht, u.a. auch von ihm selbst.) Und so treffen wir in seinen damaligen Vorstellungen auf eine Art Ersatzvorstellung. Anstelle der Materiewellen, so wie sie tatsächlich im Mikrokosmos existieren, verwendet er das Bild von Wellen, die bei der Schwingung einer Saite auftreten.

Wir wissen, daß eine Saite zu schwingen beginnt, wenn man sie anschlägt und daß der Ton, der dabei hervorgerufen wird, von der Länge der Saite abhängt. Ebensogut ist der Mechanismus bekannt, nach dem der Schall entsteht: Die Schwingungen der Saite werden an die Luft übertragen. Wir nehmen mit unserem Ohr schon nicht mehr die Saitenschwingungen wahr, sondern die Schwingungen der Luft. Zwischen beiden Schwingungen besteht jedoch ein strenger Zusammenhang. Schwingt die Saite z.B. mit einer Frequenz von $\nu = 440$ Hz, d.h., vollführt sie 440 Schwingungen pro Sekunde, so ist die Länge der entsprechenden Luftwellen gleich

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = 76 \text{ cm},$$

wobei $v = 334$ m/s die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in der Luft ist. Schwingt die Saite als Ganzes, so hören wir den Grundton. Bei einem Anschlagen der

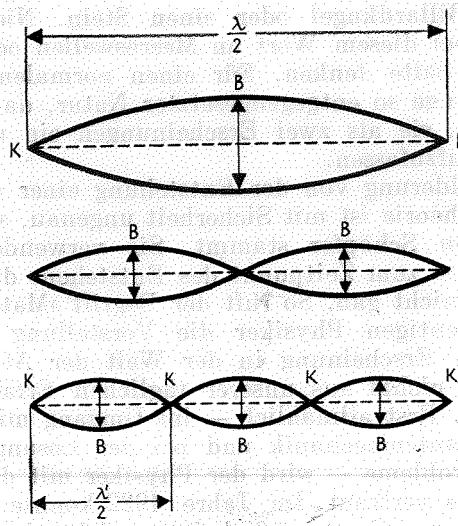

Abb. 26. Saitenschwingungen als stehende Wellen (K = Knoten, B = Bauch)

Saite entstehen aber auch zusätzliche Schwingungen — die Obertöne. Das Bild der Schwingungen wird komplizierter, auf der Saite entstehen »Knoten«, d.h. Punkte, die während des gesamten Schwingungsprozesses immer in Ruhe verharren. Für die Lage und die mögliche Anzahl der Knotenpunkte gilt folgende Bedingung: Die Länge der Saite muß sich immer als ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge $\frac{\lambda}{2}$ ergeben. Der erste Oberton entsteht, wenn zwei halbe Wellenlängen der Saitenlänge entsprechen.

Rollen wir jetzt unsere Saite zu einem Ring zusammen und stellen wir uns vor, daß dieser Ring der Elektronenbahn im Atom entsprechen möge. Nun ersetzen wir die Bewegung auf diesen Bahnen durch Wellenschwingungen, die »dem Elektron entsprechen«. (De Broglie war überzeugt davon, daß diese Annahme vernünftig ist!) Es ist leicht zu sehen, daß beim Übergang von einer geraden Saite zu einer kreisförmigen geschlossenen noch ein zusätzlicher Knoten entsteht. Dies bedeutet aber, daß der Grundton der ausgestreckten Saite sich in den ersten Oberton auf der ringförmigen Saite verwandelt. Daher ist die An-

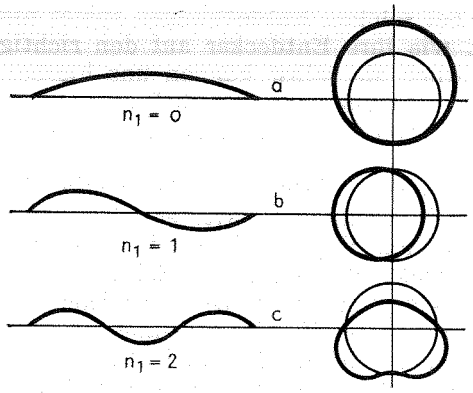

Abb. 27. Saitenschwingung und Elektronenwelle

zahl der Knoten auf einer ringförmigen Saite immer nur ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ und nicht — wie früher bei der geraden Saite — der halben Wellenlänge $\frac{\lambda}{2}$. Die Bewegung des Elektrons wird nur dann stationär sein, wenn in den Umfang der Elektronenbahn genau eine ganze Zahl n von »Elektronenwellen« der Länge λ hineinpassen. Hieraus gewinnen wir die einfache Bedingung:

$$2\pi r = n \cdot \lambda.$$

De Broglie verglich diese Bedingung mit dem ersten Bohrschen Postulat

$$mvr = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

und fand daraus die »Wellenlänge des Elektrons«

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Das ist alles. Wie wir eingestehen müssen, ist dieser Zusammenhang wirklich einfach, genauso genial einfach wie die Plancksche Formel $E = h\nu$, die Bohrschen Postulate oder das Newtonsche Gravitationsgesetz. Solche Entdekkungen lassen sich ohne großen mathematischen Aufwand machen, dafür erfordern sie aber eine gewaltige Denkarbeit, rühren sie doch an den Grundbegriffen der Physik.

Es läßt sich bei solchen Entdeckungen später niemals mehr genau sagen, wie ihre Entdecker auf den richtigen Gedanken kamen. Auch sie selbst können uns hierbei nicht helfen, sondern sie werden, danach befragt, nur wie Newton zu antworten vermögen: »Ich habe die ganze Zeit darüber nachgedacht.«

De Broglie war 30 Jahre alt, als er seine Formel fand. Doch mit der Suche danach hatte er schon elf Jahre zuvor begonnen, seit dem Tag, an dem sein Bruder Maurice aus Brüssel zurückgekehrt war, wo er Sekretär des ersten Solvay-Kongresses gewesen war. Das war jener Kongreß, auf dem Max Planck über die Entwicklung der »Quantenhypothese« gesprochen hatte. Die Bedeutung der in Brüssel vorgetragenen Entdeckungen sowie die lebendigen Eindrücke seines Bruders über die Begegnungen mit großen Physikern wirkten sehr auf den jüngeren de Broglie. Die angespannte Gedankenarbeit führte schließlich 1922 zur Hypothese über die Materiewellen. Nun endlich konnte de Broglie dem Begriff der »stationären Bahnen« einen neuen Inhalt geben: Stationäre Elektronenbahnen sind solche Bahnen, auf denen sich ein ganzzahliges Vielfaches der »Elektronenwelle« mit der Länge λ unterbringen läßt.

Wenn es sich so verhält, dann existiert das Problem der Stabilität der Elektronenbahnen nicht, denn im stationären Zustand ist das Elektron einer Saite ähnlich, die im Vakuum ohne Reibung schwingt. Die Schwingung einer solchen Saite erfährt keine Dämpfung, und ganz analog bleibt auch das Elektron im stationären Zustand, wenn es keinen äußeren Einwirkungen unterliegt.

Eine brauchbare Hypothese aufzustellen ist immer weitaus schwieriger, als daraus die richtigen Schlußfolgerungen zu ziehen. Ist sie einmal da, dann können mit Hilfe der strengen Gesetze der Logik alle Folgerungen abgeleitet werden. Die wichtigste Konsequenz aus der de Brollieschen Hypothese ist offensichtlich: Wenn »Materiewellen« existieren, so lassen sie sich beobachten und messen. Tatsächlich wurden diese »Materiewellen« dann auch beobachtet. Dies ereignete sich jedoch erst vier Jahre später, und wir werden im weiteren noch darauf zu sprechen kommen.

De Broglie schrieb seine Formeln im Jahre 1923 auf, zwei Jahre vor den Arbeiten Schrödingers und Heisenbergs.

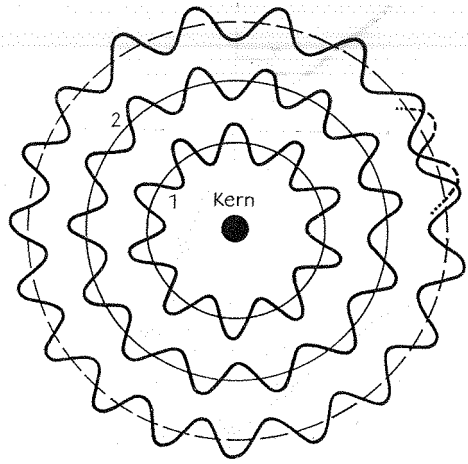

Abb. 28. Elektron als stehende Welle auf einer Bahn

Die Einfachheit der Formeln und die Klarheit der Grundidee erinnerten sehr an die Bohrschen Postulate. Gleich jenen bildeten auch die de Broglieschen Vorstellungen noch nicht die Theorie des Atoms. Dazu ist es unbedingt erforderlich, sie in der Sprache von mathematischen Gleichungen aufzuschreiben. Als Werner Heisenberg die Matrizenmechanik schuf, drückte er damit die Bohrschen Ideen in genauen Formeln und strenggültigen Gleichungen aus.

Die de Broglieschen Ideen dagegen wurden zum Ausgangspunkt der Wellenmechanik, die von Erwin Schrödinger entwickelt wurde.

Die Analogie zwischen Mechanik und Optik

Wir müssen zuerst einige neue Tatsachen kennenlernen, die uns anfangs nicht immer einfach erscheinen mögen. Doch es gilt, sie zu verstehen, wollen wir uns nicht mit der Redewendung von der »geheimnisvollen Mikrowelt« zufriedengeben, die im Grunde genommen nichts sagt.

Ob wir von Atomen oder Quanten sprechen — immer wieder wenden wir uns den Eigenschaften des Lichtstrahls zu. Das ist kein Zufall. Im Prinzip liegt in seinem Verhalten die ganze heutige Physik eingeschlossen. Schauen wir

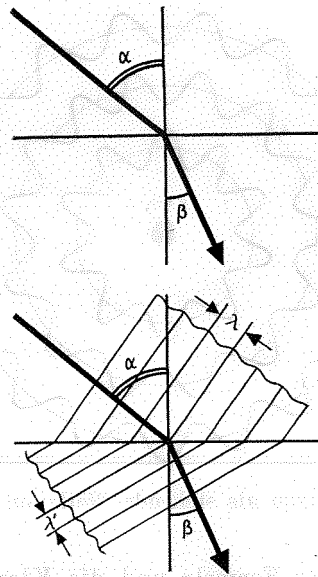

Abb. 29. Brechung

uns deshalb noch einmal genauer seine Eigenschaften an. Dazu müssen wir zu Isaac Newton zurückkehren und uns seines Streits mit Christian Huygens über die Natur des Lichts erinnern.

Es war auch damals schon lange bekannt, daß sich der Lichtstrahl im luftleeren Raum geradlinig ausbreitet. Um die Ausbreitung des Lichts anschaulich darzustellen, verbindet man die Lichtquelle und das Auge des Beobachters gewöhnlich durch eine gerade Linie, d.h., man zeichnet die Bahn, auf der sich der Lichtstrahl anscheinend bewegt.

Zu Newtons Zeiten war man der Auffassung, daß sich die Bahnkurve des Lichts weder gedanklich noch anschaulich von der Bahnkurve eines Teilchens unterscheiden läßt. Man stellte sich das Licht als einen Strom von sehr kleinen Teilchen vor. Dieser Strom von »Lichtteilchen« konnte natürlich auch eine gekrümmte Bahn zurücklegen, was z.B. beim Übergang des Lichts aus Luft in Wasser der Fall ist. Im täglichen Leben sind diese Vorstellungen sehr nützlich und führen zu keinerlei Zweifeln an ihrer Richtigkeit.

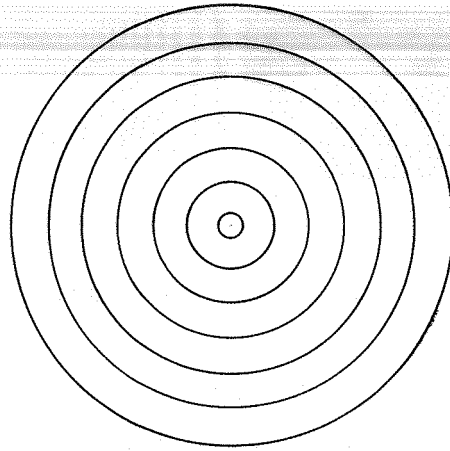

Abb. 30. Wellenausbreitung im Wasser

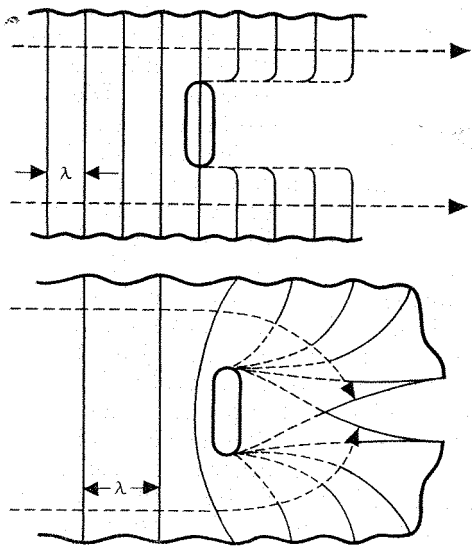

Abb. 31. Beugung

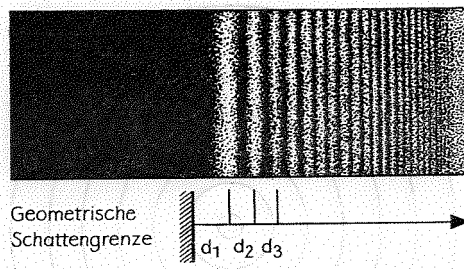

Abb. 32. Beugung von Licht

Sie helfen uns, z.B. die Lage der Sterne am Himmel zu bestimmen und Fotoapparate zu konstruieren.

Mit der Entwicklung der Experimentalphysik überschritten die Menschen die enge Grenze der täglichen Erfahrung und entdeckten neue Eigenschaften des Lichtstrahls. Es zeigte sich, daß der Lichtstrahl seine gewöhnlichen Eigenschaften vollständig verliert, wenn er auf ein sehr kleines »Hindernis« trifft. Da die Physik eine Wissenschaft von Quantitäten ist, hat eine solche Behauptung keinen Sinn, wenn wir nicht noch eine Aussage darüber hinzufügen, womit die Ausmaße des Hindernisses verglichen werden.

Christian Huygens stellte sich die Lichtausbreitung als Schwingung eines »Lichtäthers« vor. Die Vorstellung, die dabei in unserem Bewußtsein entsteht, erinnert an die konzentrischen Kreise, die sich auf der Wasserfläche eines Teiches bilden, wenn man einen Stein hineinwirft, bzw. an die unzähligen Reihen der Wellen auf dem Meer. An der Richtigkeit dieser Vorstellungen zweifelte niemand mehr nach den Arbeiten von James Clerk Maxwell und Heinrich Hertz, die nachgewiesen hatten, daß das Licht bloß ein spezieller Fall der elektromagnetischen Schwingungen ist.

Erinnern wir uns daran, daß jede Schwingung durch eine bestimmte Wellenlänge charakterisiert wird. Nun gewinnt unsere obige Behauptung einen strengen Inhalt: »Der Lichtstrahl verliert seine gewöhnlichen Eigenschaften, wenn die Ausmaße des Hindernisses von der gleichen Größenordnung sind wie die Wellenlänge des Lichtstrahls.« In diesem Falle breitet sich der Lichtstrahl schon nicht mehr geradlinig aus. Es kommt zur Beugung des Lichts. Außerdem beginnen die einzelnen Wellen untereinander in Wech-

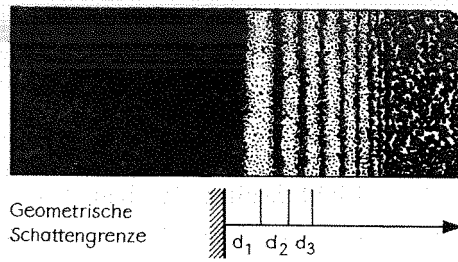

Abb. 33. Beugung von Elektronen

selwirkung zu treten, d.h., sie verstärken bzw. löschen sich gegenseitig aus. Man spricht dann in der Physik davon, daß die Wellen interferieren (sich überlagern). Beide Erscheinungen, Beugung und Interferenz, führen auf einem Bildschirm, der hinter dem Hindernis angebracht ist, zu einem Beugungsbild, das vom Standpunkt der Newtonschen Theorie schwer zu verstehen ist. Die Wellentheorie des Lichts erklärt es dagegen auf ganz natürliche Weise, was zu ihrem Sieg über die Newtonsche Theorie führte.

Mit der Zeit gewöhnte man sich so an diese Eigenschaften des Lichts, daß sie zum Kriterium für alle Wellenprozesse wurden. Bemerkte man nun bei irgendeinem Prozeß die Erscheinungen der Interferenz und Beugung, so zweifelte schon niemand mehr an seinem Wellencharakter. Daher erkannten eigentlich alle Physiker sofort die de Broglieschе Hypothese über die Materiewellen an, als sie die ersten Beugungsbilder von Elektronen sahen.

Schauen wir auf die fast gleich aussehenden Abbildungen 32 und 33. Links ist die Beugung des sichtbaren Lichts, rechts die Beugung von Elektronen gezeigt. Vergleicht man diese Aufnahmen miteinander, so fällt es einem schwer, nicht an die Wellennatur des Elektrons zu glauben. Für die heutige Physikergeneration ist dies schon keine Frage der Ansicht mehr, sondern ein Fakt genauen Wissens und ein Gegenstand technischer Anwendungen.

In der harmonischen Theorie der Wellenoptik blieb nur ein einziger Mangel: Den Lichtstrahl nehmen wir trotz allem bisher Gesagten als Strahl wahr und nicht als Welle. Wie läßt sich ein solcher Fakt vom Standpunkt der Wellenoptik erklären? Die Aufgabe löste Augustin-Jean Fresnel

(1788—1827). Seine Erklärung findet man heute in jedem Lehrbuch der Physik.

Er fand heraus, daß sich alle Wellen, die von der Quelle ausgehen, einander auslöschen. Eine Ausnahme bilden nur diejenigen Wellen, die sich im Innern eines engen Kanals von der Breite der halben Wellenlänge des Lichts befinden. (Für das sichtbare Licht besitzt der Kanal eine Breite von $\frac{\lambda}{2} \approx 3 \cdot 10^{-5}$cm.) Wenn wir die Breite des »Lichtkanals« nicht zu beachten haben, so erhalten wir die Bahnen für den Lichtstrahl, wie wir sie alle aus dem Alltag kennen.

Man weiß des weiteren, wie man bei der Kenntnis der Wellen die Bahnkurve des Lichtstrahls zu konstruieren hat. Zunächst zieht man durch alle Punkte der Wellenkämme eine Linie, d.h., man zeichnet die Wellenfront ein. Danach besteht die Aufgabe darin, durch die Lichtquelle eine Linie zu ziehen, die senkrecht auf der Wellenfront steht. Diese Linie stellt die Bahn des Lichtstrahls dar. Wenn in der Nähe eines Hindernisses die Wellenfront verzerrt wird, so wird damit gleichzeitig auch die Richtung des Lichtstrahls geändert. Der Lichtstrahl »umgeht« das Hindernis — er wird gebeugt.

Im Jahre 1834 beschäftigte sich der Professor für Astronomie an der Dubliner Universität William Rowan Hamilton (1805—1865) mit einer für seine Zeitgenossen unverständlichen Aufgabe. Er wollte beweisen, daß die formale Analogie, die zwischen der Bahnkurve für ein Teilchen und der Bahn des Lichtstrahls besteht, einen strengen mathematischen Sinn besitzt.

Wir wissen bereits, daß in der Physik dem Begriff des Bewegungsgesetzes mathematische Beziehungen zwischen bestimmten physikalischen Größen entsprechen — die Bewegungsgleichungen. Für Wellen und Teilchen sind die Bewegungsgleichungen völlig verschieden. Lösen wir diese Gleichungen, so berechnen wir entweder die Bahnkurve eines Teilchens oder die Form und die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Wellenfront. Wir wissen nun weiterhin, daß man in der Optik die Bahn eines Lichtstrahls aufzeichnen kann, wenn man die Bewegung seiner Wellenfront kennt. Hamilton bewies, daß es möglich ist, in der Mechanik etwas dazu Entgegengesetztes durchzuführen: die Bahnkurve für ein Teilchen durch die Bewegung einer gewissen Wellenfront zu ersetzen. Genauer gesagt, die Bewegungsgleichun-

gen der Mechanik lassen sich in einer solchen Form aufschreiben, daß sie vollständig mit den Gleichungen der geometrischen Optik zusammenfallen, die die Ausbreitung des Lichtstrahls ohne Berücksichtigung seiner Welleneigenschaften beschreiben. Damit bewies Hamilton die Analogie zwischen Mechanik und Optik: Die Bewegung eines Teilchens kann man darstellen wie die Ausbreitung eines Lichtstrahls ohne Berücksichtigung seiner Welleneigenschaften.

Die Schrödingersche Wellenmechanik

Erwin Schrödinger (1887—1961) hatte im Jahre 1911 sein Studium an der Wiener Universität beendet, wo die Traditionen von Christian Doppler (1803—1853), Armand-Hippolyte Fizeau (1819—1896) und Ludwig Boltzmann (1844 bis 1906) noch lebendig waren und der Geist der klassischen Zeiten in der Entwicklung der Physik die ganze wissenschaftliche Arbeit durchdrang: die Gründlichkeit bei der Untersuchung der physikalischen Erscheinungen und das beschauliche Interesse an ihnen. Im Jahre 1925 war Schrödinger allerdings schon kein sehr junger Professor mehr, als er an der Züricher Universität lehrte. Aber er hat sich den jugendlichen Schwung bewahrt, stets um das Verständnis der wichtigsten Probleme der damaligen Physik zu ringen: Wie ist das Atom aufgebaut? Wie bewegen sich die Elektronen in ihm?

Am Ende des Jahres 1925 las Schrödinger einige lobende Worte in einem Einsteinschen Artikel über de Broglie und seine Hypothese. Diese wenigen Angaben genügten für ihn, um an die Hypothese von den Materiewellen zu glauben und sie bis zu ihrem logischen Ende weiterzuentwickeln.

Es ist leicht, zumindest heute, dem Gang der Schrödingerschen Argumentation zu folgen. Als erstes rief sich Schrödinger die Hamiltonsche Analogie zwischen Optik und Mechanik ins Gedächtnis zurück. Er wußte, daß sie nur in den Grenzen der geometrischen Optik bewiesen war, d.h. für den Fall, in dem man die Welleneigenschaften des Lichts vernachlässigen kann. Daran anknüpfend, ging Schrödinger in seinen Überlegungen nun weiter, indem er voraussetzte: Die Analogie zwischen Mechanik und Optik bleibt auch für die Wellenoptik gültig. Dies bedeutet, daß eine beliebige Bewegung eines Teilchens immer der Erscheinung der Wellenausbreitung ähnlich ist.

Wie jede große Entdeckung läßt sich die Schrödingersche Hypothese auf keinerlei Weise begründen, besitzt aber eine Vielzahl bedeutender und überprüfbarer Konsequenzen.

Die wichtigste davon ist, daß die Bewegung der Teilchen in jenen Raumgebieten bzw. in der unmittelbaren Umgebung von Körpern, deren Ausmaße vergleichbar mit der Wellenlänge dieser Teilchen sind, Welleneigenschaften zeigen muß. In hohem Maße bezieht sich das eben Gesagte auf die Bewegung des Elektrons im Atom. Vergleicht man die Formeln von de Broglie ($\lambda = \frac{h}{mv}$) und Bohr ($mvr = \frac{h}{2\pi}$) miteinander, so findet man leicht, daß der Durchmesser des Atoms $d = \frac{\lambda}{\pi}$ ungefähr dreimal kleiner ist als die Wellenlänge des Elektrons λ. Die Wellenlänge des Elektrons ist die einzige Länge, die wir meinen, wenn wir über die Ausmaße des Elektrons im Atom sprechen. Nun wird offensichtlich, daß man sich ein Elektron nicht wie ein Teilchen im Atom vorstellen kann, weil man ansonsten gezwungen wäre, zu gestatten, daß das Atom aus solchen Bestandteilen besteht, die größer als das Atom selbst sind. Hieraus folgt sofort — wenngleich ein wenig unerwartet — das uns schon aus dem vorigen Kapitel bekannte Postulat Heisenbergs: Der Begriff der Bahnkurve eines Elektrons existiert im Atom nicht. Es ist unmöglich, daß sich ein größeres Teilchen in einem kleineren bewegen kann. Wenn der Begriff von der Bahnkurve für das Elektron im Atom keinen Sinn besitzt, dann entfällt auch das Problem der Stabilität des Atoms. Die Gesetze der Elektrodynamik verbieten dem Elektron, sich nur auf einer Bahnkurve zu bewegen, lassen aber andere Arten der Bewegung zu. All dies bedeutet, daß die Elektronen im Atom nicht als Teilchen existieren, sondern als Wellen, deren genauen Sinn wir ein wenig später verstehen werden. Bis jetzt ist nur eines klar: Welcher Natur die Elektronenwellen auch immer sein mögen, ihre Bewegung muß der Wellengleichung genügen. Schrödinger fand diese Gleichung (deshalb Schrödingergleichung genannt):

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}[E - U(x)]\psi = 0.$$

Für den, der diese Gleichung zum ersten Mal sieht, ist sie absolut unverständlich. Sie vermag höchstens die Neugier oder das Gefühl eines instinktiven Protestes zu erzeugen, letzteres allerdings grundlos.

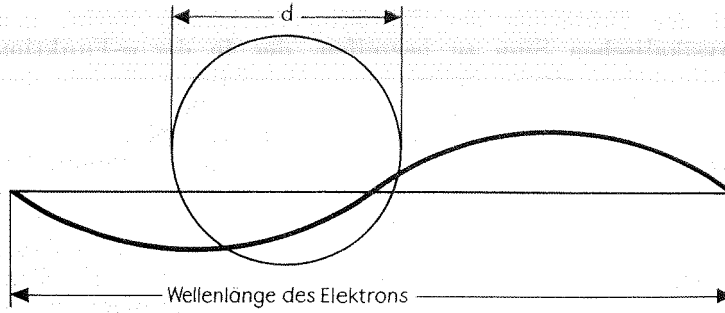

Abb. 34. Die Wellenlänge eines Elektrons und das Atom

Ebenso wie man auch den Inhalt eines Gemäldes oder eines Wappens nicht sofort vollständig erfaßt und sich erst durch das Studium der Einzelheiten mit dem Gesamtbild vertraut machen kann, wollen wir versuchen, den Inhalt des Schrödingergleichung Schritt um Schritt zu verstehen.

Versuchen wir also, diese Gleichung einfach als ein Symbol der Quantenmechanik aufzufassen und seine einzelnen Bestandteile zu verstehen. Einige Zeichen sind uns sofort verständlich: m — Masse des Elektrons; $\hbar$ — Plancksche Konstante, geteilt durch 2π; E — gesamte Energie des Elektrons im Atom, $U(x)$ — potentielle Energie des Elektrons und x — Abstand vom Kern bis zum Elektron. Ein wenig schwieriger ist das Zeichen $\frac{d^2}{dx^2}$ zu verstehen, das aus der Differentialrechnung stammt und die zweite Ableitung nach der Veränderlichen x bedeutet. Daher ist die Schrödingergleichung keine einfache Beziehung zwischen den verschiedenen Größen, sondern eine komplizierte, eine Differentialgleichung.

Und was bedeutet der geheimnisvolle Buchstabe? Den griechischen Buchstaben ψ (Psi) für die Bezeichnung der Wellenfunktion wählte Schrödinger zufällig. Für viele Laien wurde er leider ein Symbol dafür, daß die Quantenmechanik unverständlich ist. Die Wellenfunktion hätte aber ebensogut durch einen normalen, allen geläufigen lateinischen Buchstaben bezeichnet werden können.

Auf jeden Fall aber besteht die schwierigste Aufgabe

bei der Erklärung der Schrödingergleichung darin, den physikalischen Sinn zu begreifen, der in der ψ-Funktion (Psifunktion) steckt. Selbst Erwin Schrödinger deutete diese Funktion zunächst nicht richtig. Wir werden die physikalische Interpretation der ψ-Funktion erst später kennenlernen und verstehen. Hier wollen wir nur feststellen, ungeachtet aller offenen Fragen, die es zwangsläufig für den Leser noch geben muß, daß die ψ-Funktion auf eine ganz bestimmte Weise mit der Bewegung des Elektrons im Atom verbunden ist. Natürlich beschreibt die ψ-Funktion die Elektronenbewegung im Atom in einer anderen mathematischen Sprache, als die Heisenbergschen Matrizen $\{X_{nk}\}$ und $\{P_{nk}\}$, doch ist sie genauso wie die Heisenbergsche Matrizenmechanik imstande, die Sachlage richtig darzustellen. Mehr noch, viele Aufgaben der Quantenmechanik lassen sich besser und ienfacher mit Hilfe der Schrödingerschen Wellenmechanik lösen.

Die Physiker lernten sehr bald die Vorteile der Wellenmechanik schätzen: ihre Universalität, Einfachheit und Klarheit. Immer seltener wurde von ihnen die Matrizenmechanik für Berechnungen angewandt.

Jedoch stellte sich dieser Triumph für die Wellenmechanik nicht sofort ein.

Rund um das Quant

Der Comptoneffekt

Stellen Sie sich vor, Sie stehen vor dem Spiegel in einem grünen Pullover, und plötzlich stellen Sie fest, daß Ihr Spiegelbild einen roten Pullover trägt. Sicherlich werden Sie sich in einer solchen Situation zunächst verwundert die Augen reiben und noch einmal hinschauen. Ändert auch das nichts, so werden Sie schleunigst zum Arzt gehen, Ihre Augen überprüfen zu lassen, denn Sie sind sicher, daß das von Ihnen wahrgenommene Bild mit der Wirklichkeit nichts zu tun hat. Tatsächlich, das grüne Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen der Wellenlänge λ=550 nm. Treffen diese Wellen nun auf den Spiegel, so werden sie reflektiert. Dabei können sie aber auf keinen Fall ihre Wellenlänge ändern und sich z.B. in rotes Licht umwandeln. (Die Wellenlänge λ beträgt hierfür 750 nm.) Als Compton einen Röntgenstrahl der Wellenlänge λ auf einen Spalt rich-

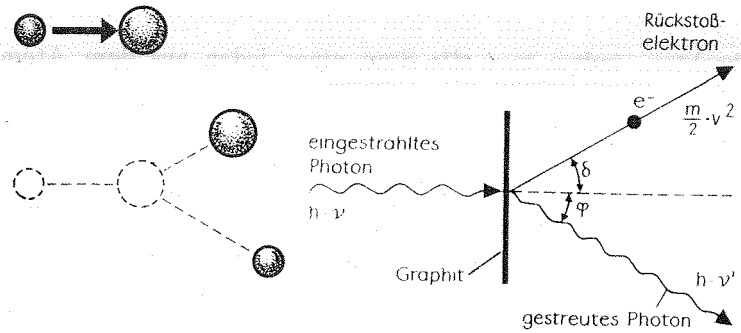

Abb. 35. Comptoneffekt

tete, beobachtete er nun aber einen solchen zunächst unerklärlichen Effekt. Die Wellenlänge λ' eines abgelenkten Röntgenstrahls ist größer als die des einfallenden.

Dieses Phänomen läßt sich verstehen, wenn man sich die Einsteinsche Hypothese über die Lichtquanten ins Gedächtnis zurückruft, die den Photoeffekt so erfolgreich erklären konnte. Nach dieser Hypothese hat man sich anstelle der Röntgenwellen der Wellenlänge λ und der Frequenz $\nu = \frac{c}{\lambda}$ einen Teilchenstrom vorzustellen, den Strom von Lichtquanten der Energie $E = h\nu$. Stoßen diese Quanten mit den Elektronen des Spalts zusammen, so lösen sie die Elektronen aus dem Atom heraus und beschleunigen diese bis auf die Geschwindigkeit v. Dabei verlieren die Quanten des Röntgenstrahls an Energie, beim Herauslösen des Elektrons aus dem Atom die Energie P und für die Beschleunigung des Elektrons auf die Geschwindigkeit v die Energie $\frac{mv^2}{2}$. Daher werden die Quanten mit einer geringeren Energie $E' = h\nu'$ reflektiert. Diese Energie berechnet sich aus der Beziehung

$$h\nu = h\nu' + P + \frac{mv^2}{2} \text{ (Comptongleichung).}$$

Verschluckt das Atom das Lichtquant vollständig ($E' = 0$), so werden wir den gewöhnlichen Photoeffekt beobachten. Die Comptongleichung wird dabei in die Einsteinsche Formel für den Photoeffekt übergehen:

$$h\nu = P + \frac{mv^2}{2}.$$

Beide Effekte lassen sich mit Hilfe der Wilsonkammer beobachten, indem man die Spur eines jeden aus dem Atom herausgelösten Elektrons verfolgt.

Nachdem wir nun die zunächst unverständlichen Effekte beim Comptonversuch derart erklärt haben, ergibt sich jetzt die Frage: Warum bleibt der grüne Pullover auch im Spiegel grün? Es läßt sich leicht zeigen, daß die gleichen Quantengesetze dafür Sorge tragen, die dem Elektron verbieten, eine beliebige Energiemenge zu absorbieren. Ein Elektron kann auf stationären Bahnen im Atom nur ein solches Quant aufnehmen, das das Elektron entweder von einer stationären Bahn auf eine andere stationäre Bahn hinüberbringt oder es vollständig aus dem Atom herauslöst (Franck-Hertz-Versuch). Die Energie der »grünen Quanten« ($\lambda = 5{,}5 \cdot 10^{-5}$ cm $= 550$ nm) beträgt nun:

$$E = h\nu = \frac{6{,}62 \cdot 10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^{10}}{5{,}5 \cdot 10^{-5}}\,\text{erg} = 3{,}6 \cdot 10^{-12}\,\text{erg} \approx 2\,\text{eV}.$$

Das ist zu wenig, um ein Elektron aus dem Atom herauszulösen. (Notwendig wäre der fünffache Energiebetrag, nämlich $P \approx 10$ eV.) Darum werden sie ohne Energieverlust (elastisch) von den Atomen reflektiert.

Ein völlig anderes Bild ergeben die Röntgenstrahlen ($\lambda \approx 0{,}1$ nm). Ihre Energie ist ungefähr fünf- bis zehntausendmal größer. Die Effekte bei solchen Energien sind ganz andere. Die Röntgenstrahlen gehen z.B. frei durch den Spiegel hindurch und werden überhaupt nicht reflektiert. Auf ihrem Weg durch den Spiegel reißen sie Elektronen aus den Atomen heraus.

In Wirklichkeit ist natürlich der Prozeß der Reflexion grünen Lichts an einem Spiegel komplizierter, als wir hier dargestellt haben. Doch resultieren hieraus keine prinzipiellen, sondern nur technische Schwierigkeiten bei einer korrekten mathematischen Behandlung. Die prinzipielle Problematik liegt woanders. Wenn wir annehmen, daß die Röntgenstrahlen die Eigenschaften von Lichtquanten besitzen, so sind wir in der Lage, den Comptoneffekt widerspruchslos zu deuten, doch völlig außerstande, mittels dieser Hypothese die experimentell von Walter Friedrich (1883 bis 1968), Paul Knipping (1883—1935) und Max von Laue (1879 bis 1960) nachgewiesene Beugung der Röntgenstrahlen zu erklären. Diese läßt sich wiederum mühelos verstehen, wenn wir die Röntgenstrahlen als elektromagnetische Wellen

auffassen. Demnach muß das Licht sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften besitzen.

Doch wie sollen wir die beiden zunächst unvereinbaren Vorstellungen — Lichtquant und Lichtwelle — miteinander in Einklang bringen? Im nächsten Kapitel werden wir sehen, wie die Quantenmechanik diese Aufgabe gelöst hat.

Das Elektron: Teilchen oder Welle ?

Täglich benutzen wir Geräte, deren Funktionsweise auf den Elektroneneigenschaften beruht: den Fernsehapparat, das Elektronenmikroskop und den Röntgenapparat. Legen wir uns die Frage vor, wie denn wohl diese Geräte arbeiten, so sehen wir sofort, daß die Frage nach der Natur des Elektrons ihren »akademischen« Charakter verliert.

Auf dem Bildschirm der Fernsehröhre erhält man die Abbildungen dadurch, daß man die Elektronen mit einer Spannung von ungefähr 10 000 V durch die Röhre treibt. Dabei erreichen sie eine Geschwindigkeit v von ungefähr $5 \cdot 10^9$ cm/s, also ein Sechstel der Lichtgeschwindigkeit. Ihre Wellenlänge läßt sich leicht mittels der de Broglieschen Formel ausrechnen: $\lambda = \frac{h}{mv}$. Man erhält daraus $\lambda \approx 0{,}01$ nm, d.h., die Wellenlänge des Elektrons ist zehnmal kleiner als das Ausmaß des Atoms. Da sich die Elektronen in der Bildröhre geradlinig ausbreiten, nehmen wir sie als einen Teilchenstrom wahr.

Die Arbeitsweise des Elektronenmikroskops beruht auf den Welleneigenschaften des Elektrons. Ein Elektronenstrahl wird durch eine Spannung von 100 000 V bis auf die Geschwindigkeit von 10^{10} cm/s beschleunigt, was einer Wellenlänge des Elektrons von 0,005 nm entspricht. Dieser Elektronenstrahl durchläuft dann ein System magnetischer Linsen, genauso wie ein gewöhnlicher Lichtstrahl im herkömmlichen Mikroskop die Glaslinsensysteme passiert.

Aus der Wellenoptik ist bekannt, daß sich selbst im besten Mikroskop ein Gegenstand nicht mehr erkennen läßt, wenn seine Ausmaße geringer sind als die Hälfte der Wellenlänge des Lichtes, mit dem der zu beobachtende Gegenstand beleuchtet wird. Die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes beträgt etwa 500 nm, und deshalb lassen sich mit einem gewöhnlichen Mikroskop nur Gegenstände voneinander unterscheiden, die größer als 250 nm sind. Die Ausmaße von

Bakterien betragen mehr als 10^{-4} cm=1000 nm, und folglich lassen sie sich leicht mit einem gewöhnlichen Mikroskop sehen. Viren kann man aber mit einem solchen Mikroskop schon nicht mehr beobachten, da ihre Ausmaße kleiner als 100 nm sind. (Der Durchmesser der Grippeviren beträgt nur 80 nm.)

Theoretisch gestattet ein Elektronenmikroskop, Objekte bis zu den Ausmaßen von 0,002 nm festzustellen, d.h. Objekte, die zehnmal kleiner als das Atom sind. Bedeutet das nun, daß wir auf diese Weise ein einzelnes Atom sehen können? Natürlich nicht. Die Bindungsenergie P des Elektrons im Atom beträgt ungefähr 10 eV. (Das ist die Energie, die ein Elektron erhält, wenn es die Potentialdifferenz von 10 V durchläuft.) Im Elektronenmikroskop erhalten die Elektronen hingegen eine zehntausendmal größere Energie. Elektronenstrahlen mit einer derart hohen Energie zerstören sofort bei ihrem ersten Zusammenprall mit ihm das Atom. Es läuft somit auf dasselbe hinaus wie der Versuch, den Schatten eines Staubkornes auf einer Wand dadurch zu erhalten, indem man mit dem Gewehr auf das Staubkörnchen schießt. Wirklich sehen kann man heute im Elektronenmikroskop Objekte mit den Ausmaßen 0,5 bis 1 nm, d.h. Objekte, die fünf- bis zehnmal größer als Atome sind.

Die Beugung der Elektronen

Wie viele Entdeckungen in der Physik, so ist auch die der Beugung der Elektronen in vielerlei Hinsicht »zufällig«. Für sie trifft die Feststellung von Louis Pasteur (1822 bis 1895) zu, daß der Zufall nur einem auf das eintretende Ereignis vorbereiteten Verstand etwas zu sagen vermag.

Im Jahre 1922 untersuchten Clinton Joseph Davisson (1881—1958) und sein Mitarbeiter im Auftrage der amerikanischen Firma »Bell-Telephone« die Reflexion von Elektronenstrahlen auf Metalloberflächen und bemerkten dabei plötzlich Unregelmäßigkeiten. Walter Elsasser, ein Schüler Max Borns, erklärte diese Anomalien im Jahre 1925, indem er, von den de Broglieschen Vorstellungen ausgehend, sie auf die Welleneigenschaften der Elektronen zurückführte. Davisson las diese Notiz, maß ihr jedoch keine besondere Bedeutung bei. Er kam 1926 nach Europa und zeigte die Ergebnisse seiner Untersuchungen Max Born und James Franck in Göttingen sowie Douglas Hartree in Oxford. Sie

alle erkannten in ihnen einmütig den Beweis für die Existenz von Elektronenwellen an, die de Broglie vorausgesagt hatte. Auf der Rückfahrt über den Ozean studierte Davisson die Arbeiten von Schrödinger, und bald nach seiner Rückkehr nach Amerika bestätigte er experimentell gemeinsam mit Lester Halbert Germer (geb. 1896) die de Broglieschе Hypothese.

George Paget Thomson (geb. 1892) ging von einem anderen Ausgangspunkt an dieses Problem heran. Er hatte schon immer große Sympathie zur de Broglieschen Hypothese empfunden. Bald nach Davissons Besuch in England begann er nach Methoden zu suchen, mit deren Hilfe diese Hypothese durch das Experiment bewiesen werden konnte. In England waren nach den Arbeiten von Sir William Crookes (1832—1909) und Lord Joseph John Thomson (1857—1939) um 1940 Experimente mit Kathodenstrahlen zu einem unbedingten und gewohnten Element der Ausbildung geworden. Wahrscheinlich hat G. P. Thomson gerade deshalb darüber nachgedacht, wie man diese Erfahrungen für die neuen Versuche ausnutzen könnte. Sehr schnell fand er eine geeignete und einsatzbereite Apparatur in Aberdeen, an der der Student Alexander Reid experimentierte. Schon nach zwei Monaten gemeinsamer Arbeit erhielten sie einwandfreie Beugungsaufnahmen von Elektronen, die ganz analog zu denen der Röntgenstrahlen waren. Dieses Ergebnis ist nicht verwunderlich, wenn man weiß, daß sie die Elektronen durch ein Potential von 150 V beschleunigten. Die Wellenlänge derart beschleunigter Elektronen beträgt ungefähr 0,1 nm, d.h., sie ist vergleichbar mit der Wellenlänge der Röntgenstrahlen und der Atomausmaße.

Zum Schluß noch eine kurze Bemerkung: George Paget Thomson ist der Sohn des berühmten » J. J.«, Joseph John Thomsons, der am Ende des vorigen Jahrhunderts festgestellt hatte, daß das Elektron ein Teilchen ist. Dreißig Jahre später bewies der Sohn, daß das Elektron eine Welle darstellt. Beide hatten recht.

Welle und Teilchen zugleich

Zu Beginn der zwanziger Jahre organisierten die Physiker Max Born (1882—1970) und James Franck (1882—1964) sowie der Mathematiker David Hilbert (1862—1943) in Göttingen ein Seminar über die Materie. Es wurde sowohl von damals bereits anerkannten Gelehrten als auch von einer später berühmt gewordenen Jugend besucht. Fast jedes Seminar begann Hilbert mit der Frage: »Also, meine Herren, gleich Ihnen möchte ich, daß man mir genau sagt: Was ist ein Atom?«

Wir wissen bereits mehr über das Atom als alle Seminarteilnehmer jener Jahre, dennoch sind auch wir noch nicht imstande, die Frage zu beantworten. Zwar haben wir relativ viele Tatsachen erfahren, doch fehlen uns noch die Begriffe, um diese Fakten richtig zu erklären.

Nach Niels Bohr stellen wir uns bei dem Wort »Atom« zunächst ein kleines Planetensystem aus einem Kern und Elektronen vor. Erst danach zwingen wir uns, an die Welleneigenschaften der Mikroteilchen zu denken. Nach wie vor existieren die Begriffe »Welle« und »Teilchen« in unserem Bewußtsein unabhängig voneinander. Sprechen wir z.B. vom Elektron, so versuchen wir unwillkürlich, uns von einem dieser Begriffe zu trennen: Teilchen oder Welle? Zu dieser Fragestellung kehrten die Physiker der zwanziger Jahre ständig zurück, indem sie eine eindeutige Bestimmtheit für das Elektron anstrebten.

Zu Anfang des Jahres 1926 gab es in der Atomphysik eine interessante Situation. Unabhängig voneinander entstanden zwei Quantenmechaniken, deren Ausgangspunkte sich grundlegend unterschieden. Werner Heisenberg war wie Niels Bohr davon überzeugt, daß das Elektron ein Teilchen darstellt, und schrieb seine Matrizengleichungen in dieser Überzeugung. Erwin Schrödinger hingegen konnte seine Differentialgleichung herleiten, indem er wie Louis de Broglie auf die Welleneigenschaften des Elektrons vertraute.

Heisenberg forderte, daß in die Gleichungen nur Größen

eingehen dürfen, die man unmittelbar im Versuch messen kann, und zwar die Frequenz der Spektrallinien und ihre Intensität. Auf dieser Grundlage schloß er aus der Theorie den Begriff »Bewegungskurve des Elektrons im Atom« als eine im Prinzip nicht beobachtbare physikalische Größe aus. Schrödinger benutzte gleichfalls den Begriff der Bahnkurve nicht. Er schrieb seine Gleichung für die ψ-Funktion auf, die jedoch ebenfalls nicht gemessen werden kann und deren Sinn sogar ihm selbst vorerst nicht klar war.

Das Experiment, der oberste Richter in allen Streitfragen der Physik, stand zunächst entschieden auf der Seite der Matrizenmechanik. In der Tat, aus Michael Faradays Versuchen folgte die Unteilbarkeit der elektrischen Ladung, und die späteren Experimente von Crookes und Thomson bewiesen sie eindeutig. Eine solche Eigenschaft kann nur ein Teilchen besitzen. Die Versuche Robert Andrews Millikans und die Fotoaufnahmen der Elektronenspuren in der Wilsonkammer beseitigten die letzten Zweifel.

Doch die Vorstellung vom Elektron als einem Teilchen stand im Gegensatz der ebenfalls unbestreitbaren Tatsache der erstaunlichen Stabilität des Atoms. Wie wir bereits mehrmals betont haben, müßte das Atom, als Planetensystem aufgefaßt, instabil sein. Um die Stabilität des Atoms zu gewährleisten und dabei gleichzeitig die Vorstellung vom Elektron als einem Teilchen aufrechtzuerhalten, hatte Niels Bohr seine Postulate formuliert.

De Broglie und Schrödinger waren einen anderen Weg gegangen und hatten gezeigt, daß sich die Stabilität des Atoms am eindeutigsten erklären läßt, wenn man annimmt, daß das Elektron eine Welle, aber kein Teilchen ist. Diese Hypothese wurde bald darauf von Davisson, Germer und G. P. Thomson experimentell bestätigt, indem sie die Beugung des Elektrons an einem Gitter nachwiesen.

Den Experimenten schenkt man im allgemeinen Glauben. Doch wie soll man von der Richtigkeit zweier Versuche überzeugt sein, deren Ergebnisse einander ausschließen? Die damalige Situation war in der Geschichte der Physik nicht ohne Beispiel und doch so ungewöhnlich, daß zunächst niemand an die Einheit beider Theorien dachte. Deshalb war man auch bestrebt, die Richtigkeit der einen und die Unhaltbarkeit der anderen Theorie nachzuweisen. Zwischen den Anhängern der Heisenbergschen und Schrödingerschen Mechanik spielte sich ein heftiger wissenschaftlicher Mei-

nungsstreit ab. Die Beendigung dieser Auseinandersetzungen führte Schrödinger selbst herbei. Anfang des Jahres 1927 bewies er die mathematische Äquivalenz beider Theorien. Für jeden Physiker bedeutete dies, daß sie auch physikalisch äquivalent sein müssen. Man hatte es also mit ein und derselben Mechanik zu tun, der Mechanik des Atoms, die in verschiedener Schreibweise formuliert worden war. Gleichzeitig bedeutete der Nachweis der Äquivalenz beider Theorien aber auch, daß die Ausgangspunkte der Heisenbergschen und der Schrödingerschen Mechanik richtig waren, nähmlich die Vorstellungen der Matrizenmechanik vom Elektron als einem Teilchen und die Vorstellungen der Wellenmechanik vom Elektron als einer Welle.

Der Welle-Teilchen-Dualismus

Je mehr die Wissenschaftler über das Atom erfuhren, um so weniger kategorisch waren die Fragen, die sie an die Natur stellten. Zu Plancks und Einsteins Zeiten wollte man wissen: Ist ein Lichtstrahl eine Welle oder ein Teilchenstrom? Nach den de Broglieschen Arbeiten versuchte man herauszufinden, ob das Elektron denn nun ein Teilchen oder eine Welle ist. Erst allmählich und unter großen Anstrengungen entstand der einfache Gedanke: Warum eigentlich sollen die Eigenschaften einer Welle und die eines Teilchens einander ausschließen? Unvoreingenommene Überlegungen zeigten, daß es keine logischen Gründe für dieses Entweder-Oder gibt. Der einzige Grund dafür, daß man sich von dieser Alternative zunächst nicht lossagte, lag darin, daß man neue Fakten mit Hilfe alter Begriffe und Vorstellungen zu begreifen suchte.

Es existiert noch eine andere Schwierigkeit; sie ist psychologischer Natur. Im Alltag sind wir gewohnt, daß die Gegenstände um so einfacher sind, je kleiner sie werden. So ist z.B. von 33 Matrjoschkas die kleinste auch die einfachste, die Billardkugel ist bedeutend einfacher als der Erdball usw. Das Ganze besteht hierbei immer aus einfacheren Bestandteilen. Als Demokrit am Ufer des Meeres saß und seinen Apfel teilte, konnte er sich das Atom vorstellen, wie immer er wollte, doch gewiß kam es ihm nicht in den Sinn, daß die Struktur des Atoms komplizierter sei als die Sichtbare des ganzen Apfels. Mitunter treten ein und dieselben Eigenschaften bei kleineren Gegenständen offen zu-

tage, während sie bei größeren unbemerkt bleiben. Genauso verhält es sich bei der fortschreitenden Teilung des Stoffes. Es entwickeln sich dabei keine neuen Eigenschaften, keine Welleneigenschaften. Vielmehr werden sie jetzt erst sichtbar. Der Stoff hat diese Eigenschaften schon immer besessen, aber wir haben sie nicht bemerkt.

Auf Erscheinungen dieser Art stoßen wir viel häufiger, als uns bewußt wird. Auch die Erde besitzt genau, wie jedes ihrer Elektronen, Welleneigenschaften. Wollte man jedoch versuchen, ihre Bewegung mit Hilfe der Schrödingergleichung zu beschreiben, so müßte man ihr eine de Broglesche Wellenlänge von ungefähr $4 \cdot 10^{-61}$ cm zuschreiben. Das ist eine so unvorstellbar kleine Wellenlänge, daß man gar nicht weiß, wie man eine solche Welle verstehen soll. Dennoch können wir nicht behaupten, daß die Erde keine Welleneigenschaften besitzt. Mittels Zirkel und Lineal sind wir ja auch nicht in der Lage, die Erdkrümmung zu messen, obwohl die Erde selbstverständlich rund ist.

Die Zahl derartiger Beispiele ließe sich beliebig erhöhen. Ein jedes von ihnen hilft letztlich auf seine Art, den Kern der Überlegungen über das Problem »Welle—Teilchen« zu verstehen.

Die Alternative »Welle oder Teilchen« gibt es nicht, denn ein atomares Objekt ist »Welle« und »Teilchen« zugleich. Mehr noch, alle Körper in der Natur besitzen gleichzeitig Wellen- und Teilcheneigenschaften, und diese Eigenschaften stellen nichts anderes als verschiedene Erscheinungsformen des einheitlichen Objekts dar, sind Ausdruck des Welle-Teilchen-Dualismus.

Auf diesen Gedanken kamen schon im Jahre 1924 Bohr, Kramers und Slater. In einer gemeinsamen Arbeit erklärten sie mit Bestimmtheit, daß der Wellencharakter der Lichtausbreitung einerseits und der Quantencharakter der Lichtabsorption andererseits die experimentellen Fakten darstellen, die man jeglicher Theorie vom Atom zugrunde legen muß und für die man keinerlei Begründungen zu suchen braucht.

Die ungewohnte Einheit von Wellen- und Teilcheneigenschaften wird in der Planckschen Formel ($E = h\nu$) und der de Broglieschen Formel ($\lambda = \frac{h}{mv}$) widergespiegelt. Die Energie E und die Masse m kennzeichnen ein Teilchen, die Frequenz ν und die Wellenlänge λ dagegen einen Wellenprozeß.

Der einzige Grund dafür, daß wir im Alltag diesen Dualismus nicht bemerken, liegt in der Kleinheit der Planckschen Konstante $h = 6{,}62 \cdot 10^{-27}$ erg·s. Selbst wenn dies ein zufälliger Umstand ist, so muß man dennoch mit ihm rechnen.

Lebten wir in einer Welt, in der die Plancksche Konstante mit den gewöhnlichen Maßstäben unseres Alltags vergleichbar wäre, dann würden sich unsere Vorstellungen von der Welt grundlegend von unseren gegenwärtigen unterscheiden. Häuser mit scharfen Umrissen oder eine stehende Lokomotive wären dort schwer vorstellbar. Mehr noch, in einer solchen Welt könnten keine Eisenbahnstrecken existieren, denn es wäre unmöglich, sie zu bauen. In den Fahrplänen wären nur der Ausgangs- und der Zielbahnhof verzeichnet. Natürlich ist eine solche Welt rein hypothetischer Natur, da wir außerstande sind, die Größe der Planckschen Konstante zu ändern. Sie ist immerfort unveränderlich und äußerst klein. Doch die Atome sind ebenfalls so winzig, daß die Plancksche Konstante mit ihren Größenordnungen vergleichbar ist. Für die Atome existiert daher diese ungewöhnliche Welt, von der wir eingangs sprachen, in Wirklichkeit, und an uns ist es jetzt, die Gesetze dieser »Atomwelt« zu begreifen. Wir befinden uns hier in einer ähnlichen Situation wie Gulliver, als er sich an die Sitten der Liliputaner gewöhnen mußte.

Die Heisenbergsche Unschärferelation

Wir sind jetzt von dem Gedanken der Einheit der Wellen- und Teilcheneigenschaften so überzeugt, daß wir unsere Erkenntnis in der exakten Sprache der mathematischen Formeln aufschreiben wollen. Diese Formeln müssen eine Beziehung zwischen den Größen herstellen, die den Begriffen »Welle« und »Teilchen« entsprechen. In der klassischen Mechanik sind diese beiden Begriffe streng voneinander getrennt und beziehen sich auf völlig verschiedene Erscheinungen der Natur. In der Quantenmechanik zwingt uns der Welle-Teilchen-Dualismus, beide Begriffe gleichzeitig zu benutzen und sie auf ein und dasselbe Objekt anzuwenden. Dieser unausweichliche Schritt ist nicht ohne bestimmte Folgen.

Völlig klar wurde das im Jahre 1927, als Werner Heisenberg herausfand, daß man beide Begriffe nur getrennt genau bestimmen kann.

In der Physik bedeutete das Definieren eines Begriffes: Es ist die Meßmethode für die Größe anzugeben, die diesem Begriff entspricht.

Heisenberg behauptete: Prinzipiell ist es nicht möglich, gleichzeitig die Koordinate x und den Impuls p eines atomaren Objekts genau zu messen. Unter Berücksichtigung der de Broglieschen Formel $\lambda = \frac{h}{p}$ heißt dies aber: Es ist grundsätzlich unmöglich, gleichzeitig exakt die Lage x eines atomaren Objekts und seine Wellenlänge λ zu bestimmen.

Daher besitzen die Begriffe »Welle« und »Teichen« bei gleichzeitiger Benutzung in der Atomphysik einen eingeschränkten Sinn. Heisenberg fand darüber hinaus auch den Zahlenwert für diese Einschränkung. Er bewies, daß die Fehler δx und δp, die bei einer gleichzeitigen Messung der Lage x und des Impulses p eines atomaren Objekts gemacht werden, nicht beliebig klein gehalten werden können. Zwischen δx und δp gilt die Beziehung

$$\delta x \cdot \delta p \geqslant \frac{h}{2}.$$

Diese Ungleichung wird Heisenbergsche Unschärferelation genannt.

Die Unschärferelation ist ein exaktes Naturgesetz. Sie hat nichts mit der Unvollkommenheit unserer Meßgeräte zu tun, denn sie sagt aus, daß es prinzipiell nicht möglich ist, die Koordinate und den Impuls eines atomaren Objekts gleichzeitig genauer zu bestimmen, als es die oben angeführte Ungleichung erlaubt.

Derartige Aussagen gibt es in der Physik mehrere. Es ist z.B. ebenfalls prinzipiell nicht möglich, eine größere Geschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit zu erzielen oder den absoluten Nullpunkt der Temperatur zu erreichen. Ebensowenig kann man sich an den eigenen Haaren aus dem Sumpf ziehen oder den gestrigen Tag zurückholen. Die Macht der Wissenschaft besteht nicht darin, Naturgesetze außer Kraft zu setzen, sondern vielmehr darin, sie zu entdecken, zu verstehen und auszunutzen.

Das Wort »unmöglich« von Wissenschaftlern zu hören, mag uns vielleicht verwundern, sind wir doch unter dem Eindruck ihrer Erfolge eher geneigt, an ihre Allmacht zu glauben. Bemerkenswerterweise werden viele Erfolge jeder

Wissenschaft jedoch gerade dann erzielt, wenn es gelingt, Verbote zu formulieren. So entstand die Thermodynamik, als man die Unmöglichkeit erkannt hatte, ein »perpetuum mobile« zu konstruieren. Die Relativitätstheorie wurde in dem Augenblick geboren, als man begriff, daß die Lichtgeschwindigkeit die größte in der Natur vorkommende Geschwindigkeit darstellt. Genauso bildete sich die Quantenmechanik in dem Moment endgültig heraus, als man verstanden hatte, daß die verschiedenen Eigenschaften des Atoms mit beliebiger Genauigkeit nicht gleichzeitig gemessen werden können.

Bei der ersten Bekanntschaft mit der Unschärferelation entsteht ein instinktiver Widerstand: Das kann doch nicht sein! Heisenberg erklärte den Grund dafür, indem er noch eine weitere Idealisierung der klassischen Mechanik verwarf — den Begriff der Beobachtung. Er wies nach, daß man diesen Begriff in der Mechanik des Atoms ebenso überprüfen und abändern muß wie den Begriff der Bewegung.

Den überwiegenden Teil seines Wissens von der Welt gewinnt der Mensch mittels seiner Augen. Diese Besonderheit der menschlichen Wahrnehmung hat unser ganzes Erkenntnissystem entscheidend beeinflußt. Fast bei jedem von uns löst das Wort »Beobachtung« die Vorstellung von einem aufmerksam schauenden Menschen aus. Wenn wir unseren Gesprächspartner ansehen, dann sind wir davon überzeugt, daß unser Blick an ihm mechanisch nichts ändert. Auf dieser Überzeugung beruht der Beobachtungsbegriff in der klassischen Mechanik. Die klassische Mechanik hatte ihren Ursprung in der Astronomie. Da niemand daran zweifelte, daß wir durch unsere Beobachtung die Sterne in keinerlei Weise beeinflussen, übertrug man dies auch alle übrigen Beobachtungen.

Die Begriffe »Erscheinung«, »Messung« und »Beobachtung« sind eng miteinander verknüpft. Schon die alten Griechen beobachteten die Erscheinungen — darin bestand ihre Methode zur Erforschung der Natur. Aus den Beobachtungen zogen sie dann allerdings rein spekulativ ihre Schlußfolgerungen. Offenbar hat sich seit jener Zeit die Überzeugung eingebürgert, daß die Erscheinung unabhängig von der Beobachtung existiert.

Wir haben den wichtigsten Unterschied der modernen Physik von der antiken Wissenschaft mehrmals betont: Die moderne Physik ersetzte die gedankliche Konstruktion,

die Spekulation, durch den Versuch. Auch die Physik von heute bestreitet nicht die objektive Existenz der Erscheinungen in der Natur unabhängig von der Beobachtung (und damit auch von unserem Bewußtsein). Aber sie behauptet, diese Erscheinungen werden nur dann zum Beobachtungsobjekt, wenn wir ein exaktes Meßverfahren für die Eigenschaften der Erscheinungen angeben. n der Physik sind die Begriffe »Messung« und »Beobachtung« nicht voneinander zu trennen.

Jede Messung besteht in einer Wechselwirkung zwischen dem Meßgerät und dem Objekt, das wir untersuchen. Jede Wechselwirkung indessen verändert den ursprünglichen Zustand sowohl des Gerätes als auch des Objektes, so daß wir im Ergebnis unserer Messungen über eine Erscheinung unterrichtet werden, die durch die störende Einwirkung des Gerätes auf das Objekt verzerrt worden ist. Nach den Annahmen der klassischen Physik konnte man alle derartigen Verzerrungen korrigieren und aus den Meßergebnissen den »wahren« Zustand des Objektes ermitteln, der unabhängig von den Messungen ist. Heisenberg zeigt nun, daß diese Annahme auf einem Irrtum beruht: n der Atomphysik sind die Begriffe Erscheinung und Beobachtung voneinander nicht zu trennen. Im Grunde genommen ist die »Beobachtung auch eine »Erscheinung«, und zwar keinesfalls die einfachste.

Wie vieles in der Quantenmechanik, so erscheint auch diese Behauptung ungewöhnlich. Versuchen wir dennoch, sie zu begreifen.

Die Alltagserfahrung zeigt: Je kleiner das zu untersuchende Objekt ist, desto leichter ist sein Zustand zu stören. In der Natur kennen wir nichts Kleineres als atomare Objekte. Daher sind wir gezwungen, die Eigenschaften atomarer Objekte mit ihrer eigenen Hilfe, d.h. mit ihnen selbst zu messen. Unter solchen Verhältnissen ist das Meßgerät vom zu messenden Objekt nicht zu unterscheiden.

Warum aber sollte man nicht erreichen können, daß ein atomares Objekt das andere im Verlaufe der Messung nur unwesentlich beeinflußt?

Beide atomaren Objekte, das Gerät wie auch das Objekt, gehören der gleichen Quantenwelt an, und ihre Wechselwirkung gehorcht daher den Quantengesetzen. Die wichtigste Besonderheit der Quantenerscheinungen aber ist ihre Diskontinuität. In der Welt der Quanten gibt es kein »ein klein wenig«. Alle Wechselwirkungen erfolgen in bestimmten

Schritten oder Portionen, in Quanten, also nach dem Prinzip: Alles oder nichts.

Wir können nicht beliebig schwach auf ein Quantensystem einwirken. Bis zu einem bestimmten Moment spürt es diese Einwirkung überhaupt nicht. Doch sobald die Stärke der Einwirkung so groß wird, daß das System bereit ist, sie wahrzunehmen, führt dies in der Regel zu einem Übergang des Systems in einen neuen Quantenzustand, oftmals sogar zu seiner Zerstörung.

Der Beobachtungsprozeß in der Quantenmechanik erinnert eher an die Geschmacksempfindung als an das Sehen. »Um die Eigenschaften des Puddings kennenzulernen, muß man ihn essen«, bemerkten die Begründer der Quantenmechanik hierzu scherzhaft. Aber ebensowenig, wie wir nach dem Aufessen des Puddings unseren Eindruck über seine Vorzüge nochmals zu überprüfen vermögen, ist es uns auch nicht möglich, unsere Angaben über ein Quantensystem unbegrenzt zu verfeinern und zu präzisieren: Das Quantensystem wird in der Regel schon durch die erste Messung zerstört. Heisenberg erkannte diese unerbittliche Tatsache nicht nur als erster, sondern er versuchte auch, sie in der Sprache der Formeln auszudrücken.

Die Unschärferelation, wie unverständlich sie uns auch immer erscheinen mag, ist eine einfache Schlußfolgerung aus dem Welle-Teilchen-Dualismus der atomaren Objekte. Zugleich stellt diese Beziehung auch den Schlüssel zum Verständnis der gesamten Quantenmechanik dar, da in ihr die wichtigsten Besonderheiten dieser Theorie vereinigt sind. Nach dieser Heisenbergschen Entdeckung war man gezwungen, nicht nur die Atomphysik, sondern auch die erkenntnistheoretischen Auffassungen der Physiker zu überprüfen.

Auch diesen Schritt vermochte allein Niels Bohr zu gehen. Er hatte seinerzeit das System der Abbilder der Quantenmechanik geschaffen; vierzehn Jahre später arbeitete er das Begriffssystem dieser Wissenschaft aus.

Nach diesen Bohrschen Arbeiten wurde klar, daß sowohl die Unschärferelation als auch der Welle-Teilchen-Dualismus nur spezielle Erscheinungsformen eines allgemeinen Prinzips, des Komplementaritätsprinzips, sind.

Das Komplementaritätsprinzip

Dieses Prinzip stellt eine der fundamentalen naturwissenschaftlichen Ideen unserer Zeit dar, mit der man nur

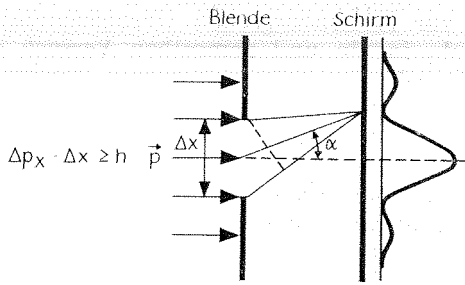

Abb. 36. Bestimmung des Ortes eines Elektrons mit Hilfe eines Spaltes

solche Ideen wie das Relativitätsprinzip oder die physikalische Feldvorstellung vergleichen kann. Es ist so umfassend, daß es sich nicht auf irgendeine einzige Behauptung reduzieren läßt. Vielmehr muß man sich dieses Prinzip allmählich, an Hand konkreter Beispiele, aneignen. Am einfachsten dürfte es sein, mit der Analyse des Meßprozesses für den Impuls p und die Koordinate x eines atomaren Objekts zu beginnen. So nahm auch Niels Bohr das Problem in Angriff.

Er stellte einen sehr einfachen Fakt fest: Es ist nicht nur unmöglich, die Koordinate und den Impuls eines atomaren Teilchens gleichzeitig zu messen, sondern es kann überhaupt nicht mit ein und demselben Meßgerät geschehen. Wollen wir den Impuls p eines atomaren Teilchens bestimmen, ohne dabei seinen Zustand allzu sehr zu verändern, dann brauchen wir ein außerordentlich leichtes, bewegliches »Meßgerät«, wozu elektromagnetische Wellen und atomare Teilchen zählen. Doch gerade wegen dieser Beweglichkeit ist die Lage des Meßgeräts unbestimmt. Zur Messung der Koordinate x müssen wir darum ein anderes, sehr massives Meßgerät benutzen, das sich bei dem Aufprall eines atomaren Teilchens nicht von der Stelle rührt. Wie sich dabei allerdings der Impuls des atomaren Teilchens verändert, können wir nicht bemerken.

Wenn wir in ein Mikrofon sprechen, so werden die Schallwellen unserer Stimme dort in Schwingungen einer Membran umgewandelt. Je leichter und beweglicher die Membran ist, desto genauer folgt sie den Luftschwingungen und desto schwieriger ist es, ihre Lage zu jedem Zeitpunkt festzustellen. Diese einfache Versuchsanordnung liefert somit eine

Illustration zur Heisenbergschen Unschärferelation: Es ist nicht möglich, in ein und demselben Versuch den Impuls p und die Koordinate x eines atomaren Objekts zu bestimmen. Dafür sind zwei Messungen und zwei prinzipiell voneinander verschiedene Meßgeräte erforderlich, deren Eigenschaften einander ergänzen oder — mit dem Fremdwort gesagt — komplementieren.

Der Gedankengang, den wir heute mit dem Wort Komplementarität verbinden, wurde nach den Arbeiten von Niels Bohr von allen Physikern akzeptiert.

Vorher waren alle davon überzeugt gewesen, daß die Unvereinbarkeit zweier Arten von Meßgeräten immer die Widersprüchlichkeit ihrer Eigenschaften nach sich zieht. Bohr wies die Geradlinigkeit dieser Überlegungen zurück und erklärte: Diese Eigenschaften sind tatsächlich unvereinbar, aber für die vollständige Beschreibung eines atomaren Objekts sind sie beide notwendig, und sie widersprechen darum einander nicht, sondern sie ergänzen sich gegenseitig.

Diese Überlegungen über die Komplementarität zweier unvereinbarer Messungen kann durch eine einfache Analogie veranschaulicht werden. Angenommen, wir wollen etwas über den Inhalt einer »black box« erfahren, die wie eine Camera obscura konstruiert ist. Zum Unterschied von einer gewöhnlichen Camera obscura hat unser Exemplar jedoch zwei Öffnungen und ist auch mit zwei fotografischen Platten bestückt, die sich jeweils gegenüber den Öffnungen an den Kastenwänden befinden. Solange beide Öffnungen geschlossen sind, wissen wir über den im Kasten befindlichen Gegenstand nichts. Öffnen wir nacheinander beide Öffnungen, dann erhalten wir auf den Platten zwei ebene Projektionen des unbekannten Gegenstandes. Jede dieser Projektionen für sich allein genommen reicht nicht aus, doch beide sind zur Herstellung eines räumlichen Abbildes des Untersuchungsobjekts gleichermaßen notwendig.

Diesen beiden verschiedenen Projektionen des Gegenstandes entsprechen zwei verschiedene — komplementäre — Messungen in der Quantenmechanik. Es ist unmöglich, beide Messungen gleichzeitig zu bewerkstelligen, da bei gleichzeitigem Aufblenden beider Öffnungen unserer Camera obscura auf jede der fotografischen Platten nicht nur der Schatten des Gegenstandes fällt, der von der hierfür notwendigen Öffnung erzeugt wird, sondern auch das Licht

aus der anderen »komplementären« Öffnung, so daß beide Bilder verdorben werden. Außerdem werden wir durch unsere erste Messung bzw. Beobachtung den ursprünglichen Zustand des Objektes verändern, d.h. den Untersuchungsgegenstand in der »black box« von der Stelle rücken oder drehen. Dies bedeutet, daß wir auf der zweiten Platte beim Öffnen der zweiten Öffnung nicht die wahre, sondern eine verfälschte Projektion des Gegenstandes erhalten. Unter solchen Umständen läßt sich das räumliche Bild nur mit einer gewissen Ungenauigkeit rekonstruieren. Dieses Ergebnis ist aber trotzdem besser als ein zwar exakteres, doch dafür nur ebenes Bild. Die Quantenmechanik behauptet, daß zur Rekonstruktion des »räumlichen Bildes« eines atomaren Objektes zwei »ebene Projektionen«, d.h. zwei komplementäre Messungen, also z.B. die Messung der Koordinate und des Impulses, genügen.

Diese Überlegungen können auch folgendermaßen formuliert werden:

Das atomare Objekt existiert als »Ding an sich«, solange wir keine Beobachtungsverfahren ermittelt haben. Die verschiedenen Eigenschaften des Objekts erfordern unterschiedliche Beobachtungsverfahren, die zuweilen nicht miteinander vereinbar sind. In Wahrheit sind die Begriffe »Objekt« und »Beobachtung« nichts als bequeme Abstraktionen, die wir zur Beschreibung des allgemeineren Begriffes »Experiment« verwenden. Die Physik untersucht niemals Objekte an und für sich, sondern stets nur konkrete Realisationen einer experimentellen Situation, die wir als »Erscheinung« bezeichnen. Unter dem Aspekt des Experiments ist jede Erscheinung eine geordnete Gruppe von Daten, die die Meßergebnisse unter der Bedingung der Reaktion des Objektes auf die Einwirkung von seiten des verwendeten Gerätes darstellen. Durch Auswahl verschiedener komplementärer Geräte verändern wir die experimentelle Situation; in ihrer jeweiligen Realisierung beeinflussen wir verschiedene Merkmale des Objektes, und indem wir jeweils die Folgen dieser Einwirkung beobachten, erhalten wir unterschiedliche Daten, d.h., wir untersuchen verschiedene Erscheinungen. Obwohl komplementäre Erscheinungen nicht gleichzeitig, nicht in einunddemselben Experiment untersucht werden können, charakterisieren sie doch einunddasselbe atomare Objekt und sind zu dessen vollständiger Charakterisierung gleichermaßen notwendig.

Es war schon immer ausschlaggebend, welche Fragen wir an die Natur richteten. Bei Fragen im Quantenbereich müssen wir besonders sorgfältig sein, weil von der Art der Fragestellung die Art der Aufgliederung der einheitlichen Natur in zwei Teile, nämlich in System und Beobachter, abhängt. Das Komplementaritätsprinzip besagt, daß mindestens zwei qualitativ voneinander verschiedene Verfahren zur Aufgliederung einer atomaren Erscheinung in System und Beobachter existieren.

Diese Überlegungen über die Komplementarität der Eigenschaften zweier unvereinbarer Geräte erklären den Inhalt des Komplementaritätsprinzips recht gut, jedoch keinesfalls erschöpfend. In der Tat benötigen wir die Geräte ja nicht »als solche«, sondern zur Messung der Eigenschaften atomarer Objekte. Die Koordinate x und der Impuls p sind jene Begriffe, die den beiden Eigenschaften entsprechen, die man mit Hilfe zweier unvereinbarer Geräte mißt. In der bereits erwähnten Erkenntniskette

Erscheinung→Abbild→Begriff→Formel

beeinflußt das Komplementaritätsprinzip in erster Linie das Begriffssystem der Quantenmechanik sowie die Logik ihrer gedanklichen Schlußfolgerungen.

Denn unter den Grundsätzen der formalen Logik existiert der »Satz vom ausgeschlossenen Dritten«. Von zwei einander entgegengesetzten Aussagen ist die eine richtig und die andere falsch; eine dritte Möglichkeit gibt es nicht. In der klassischen Physik gab es keinen Fall, in dem man an diesem Satz hätte zweifeln können, da die Begriffe »Welle« und »Teilchen« in der Tat einander entgegengesetzt und prinzipiell unvereinbar sind. Nun zeigte es sich allerdings, daß diese beiden Begriffe in der Atomphysik gleichermaßen gut zur Beschreibung der Eigenschaften ein und derselben Objekte verwendet werden können, wobei zur vollständigen Beschreibung beide Begriffe gleichzeitig benutzt werden müssen.

Wer in den Traditionen der klassischen Physik erzogen worden war, empfand diese Forderung als einen Verstoß gegen die Gesetze der Logik in der Atomphysik. Bohr erklärte nun, daß es hier nicht um die Gesetzte der Logik gehe, sondern um jene Bedenkenlosigkeit, mit der gelegentlich klassische Begriffe ohne alle Einschränkungen zur Erklärung atomarer Erscheinungen herangezogen werden. Solche Ein-

schränkungen sind jedoch notwendig, und die Heisenbergsche Unschärferelation $\delta x \cdot \delta p \geq \frac{h}{2}$ stellt die exakte mathematische Formulierung dieser Forderung dar.

Die Ursache für die Unvereinbarkeit komplementärer Begriffe in unserem Bewußtsein liegt sehr tief, ist jedoch erklärbar. Wir sind außerstande, das atomare Objekt unmittelbar, d.h. mit Hilfe unserer fünf Sinnesorgane, wahrzunehmen. An ihrer Stelle verwenden wir komplizierte und genaue Meßgeräte, die erst vor vergleichsweise kurzer Zeit erfunden worden sind. Zur Erklärung der Versuchsergebnisse benötigen wir Worte und Begriffe; diese jedoch sind lange vor der Quantenmechanik entstanden und für den Gebrauch in ihrem Bereich keinesfalls angepaßt. Trotzdem müssen wir sie benutzen, weil wir keinen anderen Ausweg haben: Die Sprache und alle Grundbegriffe machen wir uns gewissermaßen mit der Muttermilch zu eigen, jedenfalls lange, bevor wir überhaupt etwas von der Existenz der Physik erfahren.

Das Bohrsche Komplementaritätsprinzip ist ein geglückter Versuch, das historisch entstandene Begriffssystem mit dem Fortschritt unseres Wissens von der Welt in Übereinstimmung zu bringen. Dieses Prinzip hat unsere Denkmöglichkeiten erweitert, indem es deutlich machte, daß sich in der Atomphysik nicht nur die Begriffe, sondern auch die Fragestellungen nach dem Wesen physikalischer Erscheinungen selbst ändern.

Die Bedeutung des Komplementaritätsprinzips geht indessen weit über die Grenzen der Quantenmechanik hinaus, in deren Bereich es entstanden ist. Bei Versuchen, seine Anwendung auch auf andere Wissenschaftsgebiete auszudehnen, stellte sich seine wahre Bedeutung für das Gesamtsystem menschlicher Erkenntnisse heraus. Über die Berechtigung dieses Schritts läßt sich streiten, doch seine Fruchtbarkeit für alle, selbst weit außerhalb der Physik liegenden Fälle ist nicht zu leugnen.

Bohr selbst führte ein Beispiel aus der Biologie an, das mit dem Leben der Zelle verknüpft ist, deren Rolle im lebenden Organismus durchaus mit der Bedeutung des Atoms in der Physik vergleichbar ist. Wenn das Atom der letzte Repräsentant eines Stoffes ist, der dessen Eigenschaften noch bewahrt, dann bildet die Zelle den kleinsten Teil eines jeden Organismus, der noch immer das Leben in sei-

ner Kompliziertheit und Unwiederholbarkeit repräsentiert. Das Leben der Zelle zu studieren heißt alle elementaren Prozesse zu erkennen, die darin ablaufen, und dabei zu verstehen, wie die Wechselwirkung dieser Prozesse zu einer völlig anderen Daseinsform der Materie, dem Leben, führt.

Bei der Beobachtung der Zelle zeigt es sich, daß die gleichzeitige Kombination einer solchen Analyse und Synthese nicht ausführbar ist. Um in alle Einzelheiten des Zellmechanismus einzudringen, betrachten wir die Zelle im Mikroskop — zunächst im Lichtmikroskop und dann auch im Elektronenmikroskop. Wir erwärmen die Zelle, schicken durch sie elektrischen Strom hindurch, wir bestrahlen sie, zerlegen sie in ihre Bestandteile usw. Doch je genauer wir das Leben der Zelle untersuchen, desto stärker greifen wir in ihre Funktionen und den Ablauf der natürlichen Prozesse ein, die in der Zelle stattfinden. Schließlich zerstören wir die Zelle und erfahren somit gar nichts über sie als ganzheitlichen lebendigen Organismus.

Trotzdem fordert die Antwort auf die Frage »Was ist Leben?« Analyse und Synthese gleichzeitig. Diese beiden Prozesse sind unvereinbar, aber nicht widersprüchlich, sie sind nur komplementär im Bohrschen Sinne. Die Notwendigkeit, beide gleichzeitig zu berücksichtigen, ist einer der Gründe dafür, daß bis heute keine vollständige Antwort auf die Frage nach dem Wesen des Lebens gegeben werden kann.

Wie im lebenden Organismus, so ist auch im Atom die Ganzheitlichkeit seiner Eigenschaften, der Wellen- und Teilcheneigenschaften, bedeutsam. Die endliche Teilbarkeit der Stoffe führte nicht nur zur endlichen Teilbarkeit der atomaren Erscheinungen, sondern auch an die »Teilbarkeitsgrenze« der Begriffe, mit deren Hilfe wir diese Erscheinungen beschreiben.

Man sagt häufig, daß eine richtig gestellte Frage schon die halbe Antwort ist. Diese Feststellung ist mehr als eine schöne Redewendung.

Eine richtig gestellte Frage ist z.B. die Frage nach jenen Eigenschaften einer Erscheinung, die diese wirklich besitzt. Deshalb enthält eine solche Frage bereits alle Begriffe, die zu ihrer Beantwortung notwendig sind. Auf eine ideal formulierte Frage kann man kurz mit ja oder nein antworten. Bohr zeigte, daß die Frage »Welle oder Teilchen?«

in Anwendung auf ein atomares Objekt falsch gestellt ist. Das Atom hat diese Eigenschaften einzeln nicht, und deshalb erlaubt die Frage keine eindeutige Antwort mit ja oder nein. Man könnte diese Fragestellung ja sonst auch mit der vergleichen, ob ein Meter oder ein Kilogramm größer ist.

Zwei komplementäre Eigenschaften der Welt der Atome lassen sich nicht voneinander trennen, ohne dabei die Vollständigkeit und Einheit jener Naturerscheinung zu zerstören, die wir Atom nennen. Aus der Sage sind uns derartige Fälle wohl bekannt: Man kann einen Zentaur nicht in zwei Teile zerschneiden dergestalt, daß dabei das Pferd und der Mensch am Leben bleiben.

Das atomare Objekt ist weder ein Teilchen noch eine Welle und auch nicht Welle und Teilchen gleichzeitig; es ist etwas anderes als die einfache Summe der Wellen- und Teilcheneigenschaften. Dieses atomare »Etwas« ist der Wahrnehmung durch unsere Sinnesorgane unzugänglich, und dennoch existiert es. Wir verfügen weder über Sinnesorgane noch über Abbilder, die geeignet wären, uns die Eigenschaften der Realität »Atom« vollständig vorzustellen. Doch die Kraft unseres Intellekts, gestützt auf das Experiment, läßt uns trotzdem das Atom erkennen.

Als Heisenberg die klassische Vorstellung vom Zustand des physikalischen Systems als einer von der Beobachtung unabhängigen Größe verwarf, nahm er damit einige Folgerungen aus dem Komplementaritätsprinzip vorweg, da die Begriffe »Zustand« und »Beobachtung« komplementär im Sinne Bohrs sind. Streng genommen existieren beide Begriffe nicht getrennt: Wir beobachten niemals etwas schlechthin, sondern stets irgendeinen Zustand. Und umgekehrt: Jeder Zustand ist so lange ein »Ding an sich«, bis wir eine Methode zu seiner Beobachtung gefunden haben.

Jeweils für sich allein betrachtet sind die Begriffe Welle, Teilchen, Zustand des Systems oder Beobachtung des Systems Abstraktionen, die keine Beziehung zur Welt des Atoms haben. Dennoch benötigen wir sie bei der Beschreibung der Gesetzmäßigkeiten dieser Welt. Die einfachen, klassischen Bilder, die uns die Physik der Makrowelt entwirft, sind komplementär in dem Sinne, daß es zur vollständigen Beschreibung der Natur atomarer Erscheinungen der harmonischen Verschmelzung dieser beiden Extreme bedarf. Diese können aber im Rahmen der gewöhnlichen

Denkweise widerspruchsfrei nur dann nebeneinander existieren, wenn ihre Anwendungsbereiche abgegrenzt werden.

Nach langen Überlegungen kam Bohr zu dem Schluß, daß es sich hier nicht um eine Ausnahme, sondern um eine allgemeingültige Regel handelt: Jede wirklich tiefgreifende Erscheinung der Natur kann nicht durch Worte unserer Sprache eindeutig definiert werden, sondern erfordert zu ihrer Definition mindestens zwei einander ausschließende komplementäre Begriffe. Das heißt, bei Beibehaltung unserer Sprache und der gewohnten Denkweise stellt das Komplementaritätsprinzip die Grenzen für die exakte Formulierung der Begriffe auf, die wahrhaft fundamentalen Naturerscheinungen entsprechen. Solche Definitionen sind entweder eindeutig, dann aber unvollständig, oder vollständig, dann aber nicht eindeutig, da sie komplementäre Begriffe umschließen, die im Rahmen der gewohnten Logik unvereinbar sind. Zu solchen Begriffen gehören u.a. Leben, atomares Objekt, physikalisches System und Erkenntnis der Natur.

Die Wissenschaft stellt nur eine der Methoden zur Erkenntnis der Welt dar. Ein anderes komplementäres Verfahren wird durch die Kunst verkörpert. Schon die gemeinsame Existenz von Kunst und Wissenschaft ist eine gute Illustration des Komplementaritätsprinzips. Man kann sich entweder ganz der Wissenschaft oder ganz der Kunst hingeben. Beide Arten des Herangehens an die Probleme des Lebens sind gleichermaßen berechtigt, obwohl jede von ihnen für sich genommen unvollständig ist. Grundpfeiler der Wissenschaft sind die Logik und das Experiment. Fundament der Kunst sind Intuition und Einsicht. Dennoch erfordert die Ballettkunst mathematische Exaktheit, und die Geometrie bedarf der Eingebung ebensosehr wie die Poesie. Wissenschaft und Kunst schließen einander nicht aus, sondern ergänzen sich gegenseitig. Wirkliche Wissenschaft ist der Kunst verwandt, und umgekehrt enthält echte Kunst immer auch Elemente der Wissenschaft. In ihren höchsten Erscheinungsformen sind beide ebensowenig voneinander trennbar wie die Eigenschaft »Welle—Teilchen« im Atom. Sie spiegeln verschiedene komplementäre Seiten des menschlichen Erkenntnisprozesses wider und geben nur vereint eine vollständige Vorstellung von der Welt. Unbekannt ist leider die »Unschärferelation« für das

komplementäre Begriffspaar »Wissenschaft—Kunst« und somit auch die Größe des Verlustes, den wir bei einem einseitigen Herangehen an das Leben in Kauf nehmen müssen.

Natürlich ist diese Analogie wie jede Analogie unvollständig und ungenau. Sie läßt uns nur die Einheit und Widersprüchlichkeit des Gesamtsystems menschlichen Wissens empfinden.

Das Komplementaritätsprinzip stellt, außerhalb der Physik gesehen, eine bereits lange bekannte Erkenntnis dar. Im Prinzip ist es eine Kategorie der dialektischen Logik und wurde in dieser oder jener Form mehrmals von verschiedenen Philosophen ausgesprochen. Aristoteles sprach z.B. schon davon, daß »die Harmonie eine Vermischung und Verbindung von Widersprüchen darstellt«. Ebenso lassen sich Hegelsche Auffassungen und die marxistische Dialektik mit Erfolg auf die Begriffe der Quantenmechanik anwenden.

Rund um das Quant

Dualismus und Unschärferelation

In der Wellenoptik wußte man bereits seit langem, daß man im Mikroskop ein Teilchen prinzipiell nicht sehen kann, wenn seine Ausmaße geringer sind als die Hälfte der Wellenlänge des Lichts, mit dem das Teilchen beleuchtet wird. Darin erblickte man nichts Seltsames. Die Lichtwelle existiert für sich und ebenso das Teilchen. Als sich jedoch herausstellte, daß man auch dem Teilchen eine Wellenlänge zuordnen kann, verwandelte sich diese Feststellung der Wellenoptik plötzlich in die Unschärferelation: Ein Teilchen kann sich selbst nicht genauer lokalisieren als bis auf die Hälfte seiner Wellenlänge.

Zur Zeit der Entstehung der Quantenmechanik witzelten auch bedeutende Physiker mit Bitterkeit darüber, daß sie jetzt montags, mittwochs und freitags das Elektron als Teilchen und an den übrigen Tagen als Welle aufzufassen hätten. »Dies ist in höchstem Maße paradox und verwirrend«, schrieb Davisson 1928 in seiner berühmten Arbeit mit dem für die damalige Zeit charakteristischen Titel »Existieren Elektronenwellen eigentlich wirklich?«. »Wir müssen nicht nur daran glauben, daß Kaninchen in gewissem Sinne Katzen, sondern auch daran, daß Katzen in gewissem Sinne Kaninchen sind.«

Eine solche Denkweise führte zu einer Vielzahl von Paradoxa, von denen wir uns nur dann befreien können, wenn wir uns von vornherein dazu zwingen, beim Elektron nicht die Eigenschaften »Welle—Teilchen« voneinander zu trennen. Erst dann verliert die Heisenbergsche Unschärferelation ihre Merkwürdigkeit und verwandelt sich in eine einfache Schlußfolgerung aus dem Welle-Teilchen-Dualismus.

Um uns davon zu überzeugen, wollen wir ein Gedankenexperiment zur Messung des Impulses p eines fliegenden Teilchens der Masse m anstellen. Wie bekannt, gilt $p=mv$. Daher genügt es, die Geschwindigkeit v des Teilchens zu messen. Zu diesem Zweck muß man die Lagen x_1 und x_2 des Teilchens zu den entsprechenden Zeitpunkten t_1 und t_2 messen und anschließend die Geschwindigkeit nach der Formel

$$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

ausrechnen.

Wie immer bei einer Messung, so wirken wir auch hier auf das Teilchen ein und ändern damit seine Geschwindigkeit. Folglich müssen wir, wenn wir seine Geschwindigkeit so genau wie möglich messen wollen, die Punkte x_1 und x_2 möglichst nahe zueinander wählen, d.h. zum Grenzwert $\Delta x \to 0$ übergehen. In der klassischen Physik geht man auch auf diese Weise an die Lösung der Aufgabe heran.

In der Quantenmechanik hingegen können wir die Punkte x_1 und x_2 nicht beliebig nah zueinander wählen. Wir müssen immer daran denken, daß das fliegende Teilchen nicht ein Punkt, vielmehr irgendein Wellenprozeß ist. Wir dürfen uns daher das Teilchen nicht kleiner als die Hälfte der Wellenlänge λ dieses Prozesses vorstellen. Daher wird der Fehler δx bei der Bestimmung jeder der Koordinaten x_1 und x_2 größer oder, im günstigsten Falle, gleich $\frac{\lambda}{2}$ sein.

Aus diesem Grunde hat es keinen Sinn, die Entfernung $\Delta x = x_2 - x_1$ zwischen den zwei aufeinanderfolgenden Meßpunkten kleiner als $\frac{\lambda}{2}$ zu wählen. Den genauesten Wert für die Geschwindigkeit v erhält für $\Delta x = \frac{\lambda}{2}$. Die Geschwindigkeit ist dann

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{2\,\Delta t}.$$

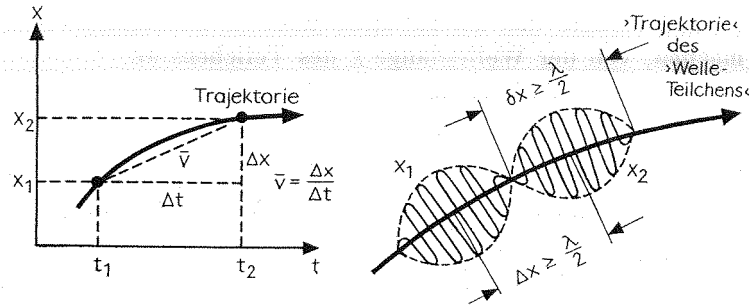

Abb. 37. Trajektorie in der klassischen und in der Quantenmechanik

Selbstverständlich enthält auch dieser Wert einen unabwendbaren Fehler δv, der von der Genauigkeit δx abhängt, mit der die Koordinaten x_1 und x_2 bestimmt werden können:

$$\delta v = \frac{\delta x}{\Delta t} \geqslant \frac{\lambda}{2\,\Delta t}\,.$$

Vergleichen wir die beiden Formeln für v bzw. δv, so gelangen wir zu dem unerwarteten, doch völlig korrekten Resultat

$$\delta v \geqslant v.$$

Das heißt, der Fehler bei der Bestimmung des Impulses p ist immer größer oder zumindest nicht kleiner als der Wert, den man bei der genauesten Messung für ihn erhält:

$$\delta p \geqslant p.$$

Die absolute Größe des Fehlers δp wird durch die Wellenlänge λ des Teilchens bestimmt. Aus der de Broglieschen Formel $\lambda = \frac{h}{p}$ erhält man für den Impuls:

$$p = \frac{h}{\lambda}\,.$$

Da nun $\delta p \geqslant p$ ist, gilt unter Berücksichtigung der de Broglieschen Formel die Ungleichung

$$\delta p \geqslant \frac{h}{\lambda}\,.$$

Somit hängt der Fehler für die Koordinate bzw. der Fehler

für den Impuls, den wir bei einer Messung notwendigerweise machen, von der Wellenlänge λ des Teilchens ab:

$$\delta x \geqslant \frac{\lambda}{2} \text{ und } \delta p \geqslant \frac{h}{\lambda}.$$

Je langsamer sich das Teilchen bewegt, desto größer ist seine Wellenlänge ($\lambda = \frac{h}{mv}$) und desto kleiner ist somit der Fehler. Für ein solches Teilchen ist nun aber die Unbestimmtheit δx bei der Messung seiner Koordinate sehr groß. Mithin können wir demnach durch Änderung der Geschwindigkeit des Teilchens entweder den Fehler δx oder den Fehler δp verkleinern, doch niemals beide Fehler gleichzeitig. Für das Produkt beider Fehler gilt immer

$$\delta x \cdot \delta p \geqslant \frac{1}{2} h.$$

Die Versuche und die Gedanken von Jean Perrin

Aus unserer vorangegangenen Analyse bekommen wir noch ein weiteres Resultat, das uns aber schon bekannt ist: Die atomaren Objekte besitzen keine Bahnkurve, da bei der Berechnung der Geschwindigkeit v des Teilchens der Grenzübergang $\Delta x \to 0$ nicht möglich ist und demzufolge die Ableitung

$$v = \frac{dx}{dt} = \lim_{\Delta x \leftarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

nicht existiert.

Alles dies sind theoretische Erwägungen. Experimentell stieß Jean Perrin zuallererst auf diese Tatsache, als er die Brownsche Bewegung untersuchte. Er schrieb darüber:

»Die Zick-Zack-Kurven sind so vielzählig und werden mit einer derartigen Geschwindigkeit durchlaufen, daß es unmöglich ist, sie zu verfolgen... Die mittlere scheinbare Geschwindigkeit des Teilchens ändert sich nach Größe und Richtung in einem bestimmten Zeitintervall gewaltig und strebt gegen keinen Grenzwert, wenn man dieses Zeitintervall verringert. Davon überzeugt man sich leicht, wenn man die Lage eines Körnchens auf dem Bildschirm zunächst nach jeder Minute fixiert, dann alle fünf Sekunden und schließlich alle zwanzigstel Sekunden fotografiert... Nicht in einem einzigen Punkt der Bahnkurve erhält man eine wohlde-

finierte Tangente. Es fällt schwer, hierbei nicht an Funktionen ohne Ableitungen zu denken, die zu Unrecht als mathematische Kuriosität betrachtet werden. In Wirklichkeit ist es die Natur selbst, die uns die Vorstellung von ihnen gleichberechtigt mit der Idee von Funktionen eingibt, die eine Ableitung besitzen.«

Fünfzehn Jahre später bestätigte der Begründer der Kybernetik, Norbert Wiener (1894—1964), die Perrinsche Vermutung, indem er eine Theorie der Brownschen Bewegung auf der Grundlage von »stetigen Funktionen ohne Ableitungen« schuf.

Natürlich ist die Brownsche Bewegung noch keine quantenmechanische. Dennoch stellt sie eine gute Illustration einiger Besonderheiten der Quantenmechanik dar.

Eine grundlegende Formel

Heisenberg verglich einmal den Naturforscher, der sich anschickt, den Bereich der unmittelbaren sinnlichen Wahrnehmung zu verlassen, um in das Gebiet allgemeinerer Zusammenhänge vorzustoßen, mit einem Alpinisten, der auf die Spitze des höchsten Berges klettern will, um die vor ihm liegende Landschaft in ihrer ganzen Mannigfaltigkeit zu überblicken. Auch der Alpinist muß die fruchtbaren, besiedelten Täler verlassen. Je höher er sich erhebt, desto weiter breitet sich die Gegend vor ihm aus, doch um so seltener sieht er in seiner Nähe Anzeichen des Lebens. Schließlich gelangt er in ein leuchtend helles Gebiet aus Eis und Schnee, wo es schon überhaupt kein Leben mehr gibt und das Atmen fast unmöglich wird. Sobald er jedoch den Gipfel erreicht hat, tritt der Augenblick ein, wo die gesamte Gegend sich unter ihm übersichtlich ausbreitet und das Leben wieder sichtbar ist.

Dieses von Heisenberg entworfene Bild erklärt gut jenen Qualitätssprung, der im Bewußtsein der Menschen vonstatten ging, als sie von der Beobachtung der Erscheinungen, die unmittelbar auf ihre Sinnesorgane einwirken, zum Studium der atomaren Erscheinungen übergingen. Dieser Umbruch vollzog sich zu Beginn unseres Jahrhunderts, und er ist so bedeutsam, daß wir ihn an dieser Stelle noch einmal an Hand eines konkreten Beispiels erläutern wollen.

Stellen wir uns vor, daß uns jemand auf der Gitarre vorspielt. Wir hören Töne, sehen schwingende Saiten, berühren sie vielleicht nachher selbst einmal mit der Hand. Auf Grund dieser sinnlichen Wahrnehmungen bildet sich bei uns das Abbild der physikalischen Erscheinung heraus, die vor unseren Augen abläuft. Zum Begriff »Wellenprozeß« gelangen wir erst später, bei der Beobachtung anderer, ähnlicher Erscheinungen und nach abstrahierendem Denken. Um ihn dann noch eindeutig zu machen, formulieren wir ihn mit Hilfe einer Formel bzw. einer Gleichung, die uns von vornherein den gesamten Schwingungsprozeß der Saite vorhersagen kann. Die Voraussagen schließlich können wir

dadurch überprüfen, indem wir z. B. die Schwingungen der Saite filmen.

Wir wollen hier ganz bewußt noch einmal der Kette Erscheinung → Abbild → Begriff → Formel → Experiment folgen, die jeder physikalischen Erkenntnis zugrunde liegt. Das letzte Glied dieser Kette, das Experiment, überprüft, wie richtig wir uns die gesamte Erscheinung an Hand von Einzelkenntnissen über sie vorgestellt haben, d.h., wie wichtig das Abbild ist.

Dieses einfache Schema hilft uns jedoch nicht, auf die Frage »Was ist ein Atom?« zu antworten. Die Erscheinung »Atom« wirkt nicht direkt auf unsere Sinnesorgane und kann uns daher auch kein »Abbild des Atoms« liefern, selbst nicht das gröbste. Folglich entstand der Begriff »Atom« zunächst rein spekulativ, ohne Bezugnahme auf die Sinnesorgane und blieb im Verlaufe von zwanzig Jahrhunderten nicht mehr als eine interessante Hypothese, die um nichts besser war als andere Hypothesen über den Bau der Materie.

Die wirkliche Geschichte des Atoms begann mit der Entwicklung der Wissenschaft, als die Menschen anfingen, nicht nur ihren Sinnesorganen, sondern auch den Meßgeräten zu vertrauen. Mit Hilfe von Meßgeräten beobachteten sie beispielsweise, wie sich eine Substanz verhält, wenn man sie in Wasser auflöst; was passiert, wenn man einen elektrischen Strom durch eine Lösung hindurchschickt; wie sich ein Körper bei Erwärmung, bei Beleuchtung und bei vielen anderen Einwirkungen verhält. Die Wissenschaftler beobachteten nicht einfach diese Erscheinungen, sondern sie untersuchten sie, d.h., sie maßen die Temperatur der Körper, die Wellenlänge des von ihnen ausgesandten Lichts und vieles andere, worüber wir schon eingangs berichteten. Die Ergebnisse ihrer Messungen schrieben sie in Form von Zahlen auf. Diese Zahlen ersetzten den Physikern jene unmittelbaren Wahrnehmungen, die ihnen früher die Sinnesorgane lieferten. Die Zahlen waren das einzige, dem die Wissenschaftler Glauben schenkten, als sie Erscheinungen zu untersuchen begannen, die der unmittelbaren Wahrnehmung unzugänglich sind. Im Besitz dieser Zahlen begannen sie, Zusammenhänge zwischen ihnen herzustellen und diese Zusammenhänge in Formeln aufzuschreiben.

Aber die Menschen verständigen sich nicht nur mit Hilfe der Formeln, sondern auch mit Worten. Um über die neuen Zusammenhänge in der Natur einander berichten

zu können, denken sich die Menschen Begriffe aus, die diesen Formeln entsprechen. Zuweilen sind diese Begriffe sehr fremdartig, doch gewöhnen sich die Menschen schnell an sie, lernen, richtig mit ihnen umzugehen und schaffen für sich selbst irgendwelche Abbilder, die sie mit den neuen Begriffen verbinden.

Die Erkenntniskette verläuft nun in umgekehrter Richtung:

Erscheinung ← Abbild ← Begriff ← Formel ← Experiment.

In der Geschichte des Atoms läßt sich diese Kette leicht verfolgen: Fraunhofer, Kirchhoff und Bunsen beobachteten, daß jedes Atom eine ganz bestimmte Folge von Spektrallinien aussendet (Erscheinung) und daß jeder Spektrallinie eine Zahl entspricht, die Wellenlänge λ (Experiment). Balmer, Rydberg und Ritz fanden zwischen diesen Zahlen einfache Zusammenhänge (Formel), während Bohr zeigte, daß ihre Formeln aus einem einheitlichen Prinzip folgten, das er Quantisierung nannte (Begriff). Schließlich bildete sich auf der Grundlage dieser Experimente, Formeln und Begriffe eine anschauliche Vorstellung, ein Abbild heraus, das Bohrsche Atommodell.

Die Experimente wurden weiter fortgesetzt, sie brachten neue Zahlen und Fakten, die sich schon nicht mehr in den Rahmen der früheren Formeln, Begriffe und Abbilder einfügten. Zu diesem Zeitpunkt entstand die Quantenmechanik, ein einheitliches Prinzip, aus dem alle früheren empirischen Formeln und erfolgreichen Vermutungen sich ableiten.

Bis hierher erfuhren wir recht viel über die Experimente, die in der Atomphysik durchgeführt wurden, sowie über die Begriffe, die man benutzen muß, um diese Versuche erklären zu können. Doch wir wollen noch mehr erreichen. Auf diesem neuen, höheren Wissensniveau wollen wir ein Abbild vom Atom schaffen. Dazu müssen wir, wenn auch nur flüchtig, die Formeln der Quantenmechanik streifen.

Die Schrödingergleichung

Die vorausgegangenen Ausführungen zur Quantenmechanik überzeugten uns fast davon, daß das Elektron im Atom keine bestimmte Lage oder keine bestimmte geschlossene Bahnkurve besitzt, auf der es sich bewegt. Als Ersatz dafür können wir bis jetzt nur die gerade erst von uns angeeignete

Idee anbieten, daß das Elektron bei der Bewegung im Atom »zerfließt«.

Schrödinger gelang es, diese zunächst unscharfe Idee sehr genau in der eindeutigen Sprache der Formeln auszudrücken. Die Schrödingergleichung läßt sich wie auch jedes andere grundlegende Naturgesetz nicht aus einfacheren Gesetzen ableiten. Man kann sie nur erraten. Schrödinger ging auch dementsprechend vor und bekannte dann später, daß er selbst nicht völlig versteht, wie ihm dieses Unterfangen glückte. Nachdem nun die entsprechende Gleichung gefunden war, mußte man noch lernen, mit ihr richtig umzugehen. Dazu benötigt man die Kenntnis, was die Symbole in der Gleichung bedeuten und welche Erscheinungen im Atom sie abbilden. Die Schrödingergleichung

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}[E - U(x)]\psi = 0$$

haben wir schon einmal angeführt und erklärten dabei auch die Bedeutung der in ihr auftretenden Symbole: $\hbar$ — Plancksche Konstante h, geteilt durch 2π; m — Masse des Elektrons; E — Gesamtenergie des Elektrons im Atom; $U(x)$ — potentielle Energie des Elektrons im Atom. Die potentielle Energie gibt an, mit welcher Kraft das Elektron zum Kern gezogen würde, wenn es ein Teilchen wäre und sich im Abstand x vom Kern befände. Nach wie vor ist uns jedoch der Sinn der Wellenfunktion ψ nicht klar. Um ihn zu verstehen, wenden wir uns wiederum der Analogie mit einer schwingenden Saite zu.

Die Gleichung für eine schwingende Saite

$$\frac{d^2U}{dx^2} + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 U = 0$$

ist der Schrödingergleichung sehr ähnlich. $U(x)$ stellt die Auslenkung der Saite an der Stelle x aus der Ruhelage dar, während λ die Länge der Schallwelle ist, die einer bestimmten Saitenschwingung entspricht. Einige Lösungen der Gleichung für eine schwingende Saite sind in der Abb. 38 dargestellt, wobei $U_k(x)$ eine bestimmte Lösung bezeichnen soll. Wir sehen, die Lösungen sind nichts anderes als die gut bekannten Sinuskurven. Der Sinn dieser Kurven ist klar: Sie stellen die Form der Saite zu einem bestimmten Zeitpunkt dar, sie sind gleichsam eine Momentaufnahme ihres Schwingungsprozesses. Die Form der Schwingungen

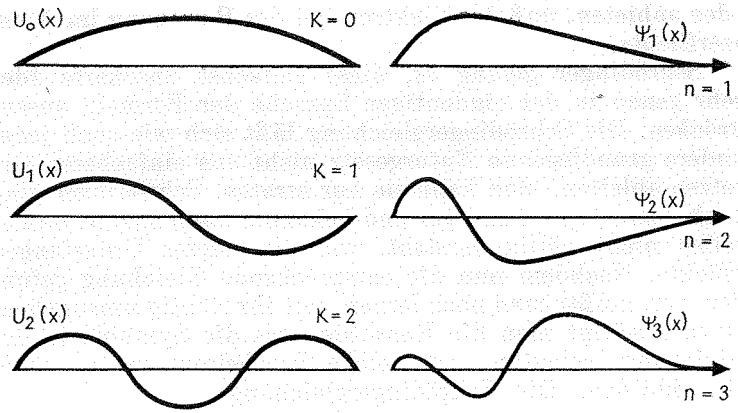

Abb. 38. Analogie: Schwingende Saiten und Wellenfunktionen

der Saite hängt von der Anzahl der Knoten k ab, d.h. von der Anzahl derjenigen Punkte der Saite, die während der Schwingung in Ruhe bleiben. Daher existieren unendlich viele Lösungen $U_k(x)$, die sich voneinander durch die Anzahl der Knoten unterscheiden.

Nun schauen wir auf die Abb. 38, in der neben den Sinuskurven der Saite $U_k(x)$ die Lösungen $\psi_n(x)$ der Schrödingergleichung für das Wasserstoffatom abgebildet sind. Beide Lösungen sind einander sehr ähnlich. Selbst wenn im Atom keinerlei reale Schwingungen ähnlich denen der Saite vonstatten gehen, so bleibt diese Analogie dennoch nicht weniger nützlich.

Sie gestattet nämlich, die Lösungen $\psi_n(x)$ mittels der ganzen Zahl n ebenso zu numerieren wie die Lösungen $U_k(x)$ mit Hilfe der ganzen Zahl k. Mehr noch, es zeigte sich, daß diese ganze Zahl n jene unverständliche Quantenzahl darstellt, mit der Bohr die Bahnkurven im Atom numerierte. Nunmehr hat sie ihren undurchschaubaren Charakter verloren. Die Quantenzahl n ist gleich der Anzahl der Knoten der Wellenfunktion plus eins: $n=k+1$.

Das erste Bohrsche Postulat schrieb den Elektronen vor, sich nur auf den Bahnen zu bewegen, bei denen die Quantisierungsbedingung

$$mvr = n\frac{h}{2\pi}$$

erfüllt wird.

Diese Forderung war fruchtbar, doch für die Physik unnatürlich und rief daher bei den Wissenschaftlern gemischte Gefühle hervor. Die Schrödingersche Forderung ergibt sich viel natürlicher: Wie kompliziert die Bewegung des Elektrons auch immer sein mag, das Elektron muß sich immer innerhalb des Atoms befinden. Darum muß die ψ-Funktion, die diese Bewegung »darstellt«, unabhängig von ihrer konkreten Form immer auf die nächste Umgebung des Kerns konzentriert sein. Diese einzige Grenzbedingung erlaubt bereits, aus der Schrödingergleichung die Bohrschen Quantisierungsbedingungen, die Gesamtenergie des Elektrons auf den stationären Bahnen sowie den Sinn der Quantenzahlen abzuleiten.

Damals eroberten diese Ergebnisse der Schrödingerschen Theorie die Köpfe vieler Physiker durch ihre Einfachheit. Man glaubte an die Richtigkeit der Schrödingergleichung und schickte sich an, den letzten Schritt zu gehen, den Sinn der Wellenfunktion zu ergründen. Man stellte sich die Frage:

Wenn die Funktion $U_k(x)$ die Form der schwingenden Saite darstellt, was bedeutet dann die Wellenfunktion $\psi_n(x)$?

Der physikalische Sinn der ψ-Funktion

Diese Frage ist eine der schwierigsten in der gesamten Quantenmechanik. Selbst Schrödinger beantwortete sie zunächst nicht richtig. Dennoch ist seine Antwort so einleuchtend und nahe der Wahrheit, daß wir sie zunächst benutzen wollen: Das Elektron existiert im Atom nicht als Teilchen. Es zerfließt dort in irgendeine Wolke. Die Form und die Dichte dieser Wolke wird durch die Wellenfunktion $\psi_n(x)$ bestimmt. In einer Entfernung x vom Kern ist die Dichte der Elektronenwolke gleich dem Quadrat dieser Funktion:

$$\rho_n(x) = |\psi_n(x)|^2.$$

Um diesen Gedanken besser zu verstehen, wollen wir uns hier noch einmal an die Melone erinnern, mit der wir unsere Ausführungen über die Quantenmechanik begannen. Wir werden die spezifische Dichte $\rho(x)$ dieser Melone in Abhängigkeit vom Zentrum auftragen. Es ist klar, daß die Funktion $\rho(x)$ für die Melone überall ungefähr konstant ist. Sie wächst nur ein wenig nach außen hin wegen der

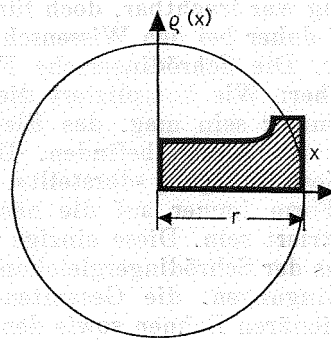

Abb. 39. Dichte einer Melone, aufgetragen über dem Radius

Kerne und der Schale. Ist die Melonenoberfläche erreicht, so bricht die spezifische Dichte hier plötzlich ab (Abb. 39). Selbst ein Mensch, der kein einziges Mal eine Melone gesehen hat, kann sich an Hand unserer Abbildung von $\rho(x)$ ungefähr denken, wie die Melone innen aufgebaut ist. Natürlich wird er dabei nicht die geringste Vorstellung davon bekommen, wie die Melone aussieht, wie sie riecht, schmeckt sowie von vielen anderen Einzelheiten, die eine Melone von einer anderen bzw, von anderen Gegenständen unterscheidet.

Wenn wir versuchen, in das Innere des Atoms einzudringen, dann befinden wir uns alle in der Lage eines Menschen, der noch niemals im Leben eine Melone sah, sie sich aber mit Hilfe der Funktion $\rho(x)$ vorstellen will. Für das Atom errechnet man die Funktion $\rho_n(x)$ aus der Schrödingergleichung und zeichnet dann mit ihrer Hilfe die Verteilung der Elektronenwolke im Atom auf. Diese Bilder ersetzen uns jenes visuelle Abbild des Atoms, nach dem wir alle unbewußt streben.

Hier sind die räumlichen Abbildungen für das Wasserstoffatom dargestellt, so wie sie sich aus den Funktionen $\rho_n(x)$ ergeben, die mit Hilfe der Schrödingergleichung berechnet wurden. Sie stellten auch das neue Abbild des Atoms dar, auf das wir so lange zusteuerten und an das wir uns nun gewöhnen müssen. Aus dem weiteren Verlauf der Darlegungen werden wir sehen, daß das hier entwickelte Abbild sich nur noch geringfügig ändert. Besser und richti-

ger sagen wir, daß sich nicht das Abbild ändern wird, sondern wir eine andere Einstellung zu ihm bekommen.

Nun liegt das Schwierigste hinter uns, und wir können uns ohne Hast den Ergebnissen zuwenden, die diesen neuen Vorstellungen entspringen. Kehren wir vor allem wieder zu der Frage »Was ist ein Atom?« zurück, und beantworten wir sie aus der Sicht unserer jetzigen Erkenntnisse.

Das Atom und die Schrödingergleichung

Erinnern wir uns an das Thomsonmodell des Atoms — eine große positiv geladene Kugel, in der kleine negative Elektronen schwimmen. In Wirklichkeit liegen jedoch die Verhältnisse umgekehrt: Im Zentrum des Atoms befindet sich ein sehr kleiner, positiv geladener Kern, der von einer negativ geladenen Elektronenwolke umgeben wird. Die Form dieser Wolke ist nicht willkürlich, sie wird durch die Gesetzte der Quantenmechanik bestimmt. Natürlich stellt das Atom keine Kugel mit scharfen Grenzen dar, doch im großen und ganzen ist das Wasserstoffatom im nichtangeregten Zustand einer Kugel sehr ähnlich. (Die Form des Atoms erriet Demokrit somit richtig.)

Regt man das Atom an, so muß man Energie für die Änderung der Struktur der Elektronenwolke aufbringen. Jeder möglichen Form der Wolke entspricht eine ganz bestimmte Energie. Um das Atom von einer Form in eine andere zu bringen, ist eine ganz bestimmte Energiemenge erforderlich, und zwar das Quant $h\nu$, wie dies auch durch das zweite Bohrsche Postulat gefordert wurde.

Bis jetzt haben wir bewußt nur vom Wasserstoffatom gesprochen. Es ist im Prinzip das einzige Atom, das der Physiker heute in allen Einzelheiten kennt und von dem er sich ein glaubwürdiges Abbild verschaffen kann. Das ist mehr oder weniger allen Physikern klar. Doch in den ersten Jahren nach dem Entstehen der Quantenmechanik war der Enthusiasmus der Sieger so groß, daß sie die Bedeutung der Chemie völlig mißachteten. »Vom Standpunkt des Physikers existiert die Chemie nicht als selbständige Wissenschaft«, erklärten die eifrigsten von ihnen. »Gebt uns die Ladung des Kerns, und wir konstruieren für ihn die Elektronenwolken so gut, daß man sie nicht von den in der Natur existierenden unterscheiden kann.«

Man begann nach diesem Rezept die Elektronenwolken

zu berechnen. Dabei stellte sich heraus, daß es ohne die Chemie doch nicht geht. Schon beim Lithium stolperte man. Anstelle von zwei Elektronen auf der ersten Schale und einem Elektron auf der zweiten Schale setzte man fälschlicherweise alle drei Elektronen auf eine Schale. Doch in den Jahren des Aufschwungs werden solche Schwierigkeiten schnell überwunden.

Den Ausweg aus der entstandenen Situation fand man sofort, als man sich das periodische System der Elemente ansah, das auch schon früher Physikern und Chemikern aus Schwierigkeiten geholfen hatte. Wenn die chemischen Eigenschaften der Elemente von den Elektronen abhängen, die den Kern umgeben, dann weist das Auftreten der Periodizität in den chemischen Eigenschaften der Elemente geradewegs darauf hin, daß die Elektronen in den Atomen nicht beliebig angeordnet sind, sondern in Gruppen — den Schalen. Es war daher völlig logisch, anzunehmen, daß die Zahl der Elektronen in jeder der äußeren Schalen mit der Länge der Periode im Mendelejewschen System zusammenfällt. Diese Idee hatte als erster Wolfgang Pauli.

Erst danach gelang es, nicht nur das Abbild des Wasserstoffatoms zu schaffen, sondern auch das komplizierterer Atome. Im großen und ganzen unterscheidet sich die Elektronenwolke in höheren Atomen nicht sehr von der des Wasserstoffatoms. Berechnen konnte man sie jedoch erst, nachdem die Arbeiten des englischen Physikers Douglas Hartree und des sowjetischen Physikers Wladimir Fock erschienen waren. Die Berechnung der Elektronenwolke höherer Atome ist eine schwierige Aufgabe, die zuweilen sogar für die modernen Computer zu schwer ist.

Wenn wir über die Formen von Körpern sprechen, so setzen wir normalerweise voraus, daß sie auch bestimmte Ausmaße besitzen. Diese Annahme ist jedoch nicht immer gerechtfertigt: Eine Billardkugel besitzt eine bestimmte Form und bestimmte Ausmaße; die Ausmaße einer Wolke exakt anzugeben, obwohl deren Form gewöhnlich keine Zweifel hervorruft, durfte schon schwerfallen.

Die überraschendste Schlußfolgerung aus dem neuen Atommodell besteht darin, daß das Atom keine bestimmten geometrischen Ausmaße besitzt. Mit anderen Worten, die Grenze des Atoms läßt sich nur bedingt feststellen. Die Situation ist ganz analog der bei der Wolke. Wir sind gezwungen, diese Schlußfolgerung aus dem neuen Atommodell

anzuerkennen, da sich nur auf ihrer Grundlage die beobachteten Eigenschaften der Körper erklären lassen, z.B. die Mannigfaltigkeit der geometrischen Formen der Kristalle. Diese Tatsache darf uns nicht besonders verwundern, auch die verschiedensten Steinhäuser sind nicht aus kleinen Miniaturhäusern aufgebaut. Die uns umgebenden Körper besitzen eine Farbe, einen Geruch sowie Ausmaße, doch die Atome, aus denen sie sich zusammensetzen, besitzen keine einzige dieser Eigenschaften. Die Atome haben nur eine unveränderliche Eigenschaft — die Masse. Unveränderliche Formen gibt es für das Atom nicht. Unveränderlich sind nur die Gesetze der Quantenmechanik, nach denen sich die Formen der Atome ändern.

Warum ist denn nun aber das Atom, das selbst über bestimmte Ausmaße nicht verfügt, derart stabil? Diese Stabilität sollte uns nicht allzusehr erstaunen. Auch die Erde hält unveränderlich ihren Kurs im Weltraum. Das Geheimnis der Stabilität ihrer Bewegung liegt in der Unveränderlichkeit der Gesetze der Dynamik, nach denen sich diese Bewegung vollzieht. In der Unveränderlichkeit und unbedingten Geltung der Naturgesetze liegt auch der Grund für die Stabilität der Atome, wobei die Gesetze, die gewissermaßen die Bewegung der Elektronen lenken, überhaupt nicht denen der Himmelsmechanik gleichen. (Der Vollständigkeit halber sei hier noch bemerkt, daß die Stabilität in der Mikrowelt weitaus größer ist als die dynamische Stabilität der klassischen Mechanik. Ein zerstörtes Atom stellt wieder seine Struktur her, doch die Bahn der Erde nähme niemals wieder ihre frühere Gestalt an, wenn sie durch das plötzliche Auftreten eines fremden kosmischen Körpers gestört würde.)

Die Atome der verschiedenen Elemente unterscheiden sich voneinander durch die Masse und die Ladung des Kerns. Durch welches Merkmal lassen sich aber nun zwei Atome ein und desselben Elements auseinanderhalten? Für die Melonen ist eine derartige Frage bedeutungslos, denn noch niemand sah zwei einander völlig gleiche Melonen. Schon schwieriger ist es, zwei Ziegelsteine nicht zu verwechseln. Erst wenn man sie zerschlägt, vereinfacht sich die Aufgabe ein wenig.

Ähnlich verhält es sich mit den Atomen. Wenn die Masse und die Ladung ihrer Kerne gleich sind, dann können sich die Atome nur durch die Form ihrer Elektronenwolke von-

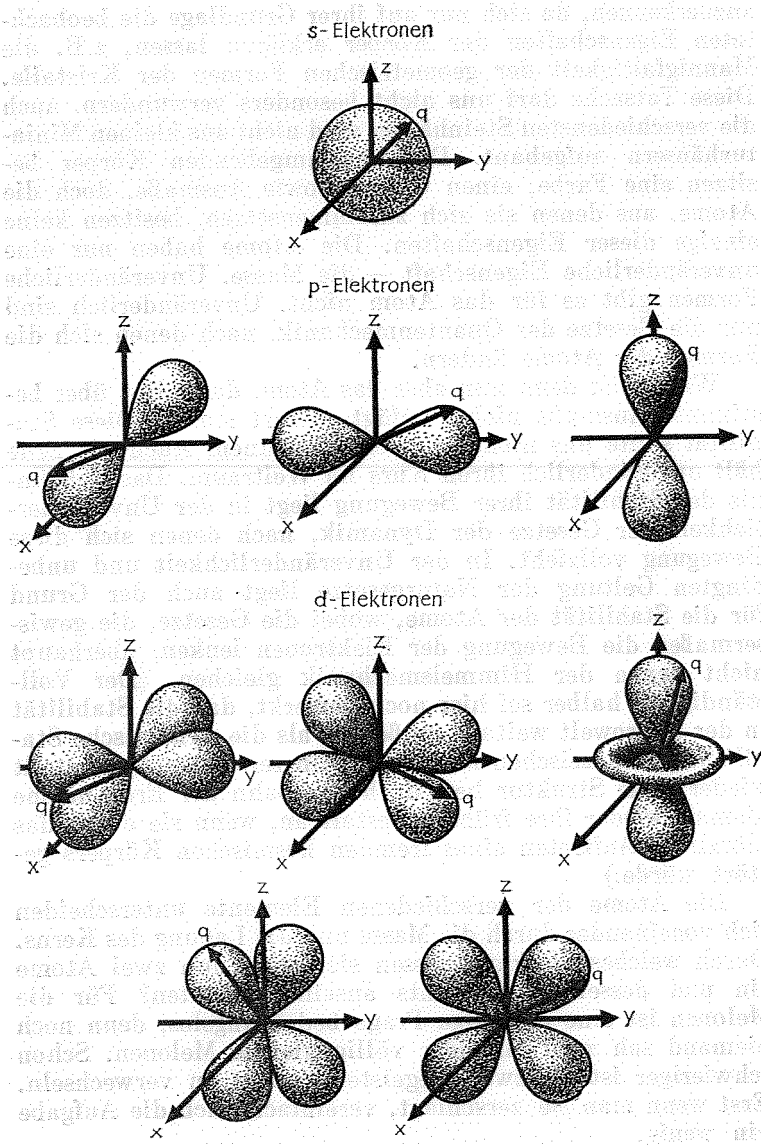

Abb. 40. Verteilung der Elektronendichte beim Wasserstoffatom

einander unterscheiden. Andere Eigenschaften außer den hier aufgezählten — Masse und Ladung des Kerns, Form der Elektronenwolke — besitzt das Atom einfach nicht. Zwei Atome mit gleicher Masse des Kerns und gleicher Kernladung lassen sich nur dann auseinanderhalten, wenn sich eines von ihnen im angeregten Zustand befindet. Alle Atome eines Elements, die sich im nichtangeregten Zustand (Grundzustand) befinden, sind nicht zu unterscheiden.

Die Darstellungen des Atoms in den Abb. 40 und 41 spiegeln unser heutiges Wissen über dieses Objekt wider. Sie stellen das heutige Abbild des Atoms dar, das die Modelle von Demokrit, Thomson und Bohr als Vorgänger hatte. Natürlich darf man auch die modernen »Porträts« der Atome nicht allzu genau nehmen. Sie sind keineswegs »Fotoaufnahmen« des Atoms. Weder mit einfachen noch mit komplizierten Meßgeräten können wir direkt die Verteilung der Elektronendichte innerhalb des Atoms messen, weil eine solche Messung unweigerlich das Atom zerstören würde. (Sogar die Melone muß man zerschneiden, will man ihre Qualität prüfen.) Dennoch gibt es für uns genügend Gründe, an das von der Quantenmechanik gelieferte Bild zu glauben. Mit seiner Hilfe sind wir in der Lage, alle Versuche folgerichtig zu erklären, die uns zur heutigen Auffassung des Atoms geführt haben.

Haben wir das heutige Bild vom Atom vor Augen, so wundert es uns nicht, daß die Alphateilchen in den Rutherfordschen Versuchen ungehindert durch Milliarden Atome hindurchflogen wie durch einen leeren Raum. (Die Erde weicht auch nicht von ihrer Bahn ab, wenn sie durch Kometenschweife hindurchgeht.) Verständlich erscheint uns nun auch der Mechanismus, der zum Auftreten von Spektrallinien führt. Das Atom ändert sprunghaft die Form seiner Elektronenwolke, indem es ein Energiequant ausstrahlt. Des weiteren können wir jetzt auch die Aufspaltung der Spektrallinien im elektrischen Feld (Starkeffekt) und im Magnetfeld (Zeemaneffekt) leicht verstehen. Die Elektronenwolke ist geladen, und ihre verschiedenen Formen ändern sich folglich unter der Einwirkung dieser Felder ein wenig. Mit dieser Änderung der Elektronenwolke geht auch eine Änderung des Energiequants einher, das man benötigt, um die Wolke aus einer Form in die andere zu bringen, sowie der Frequenz ν der Spektrallinie, die diesem Quant entspricht. Diese einfachen physikalischen Überle-

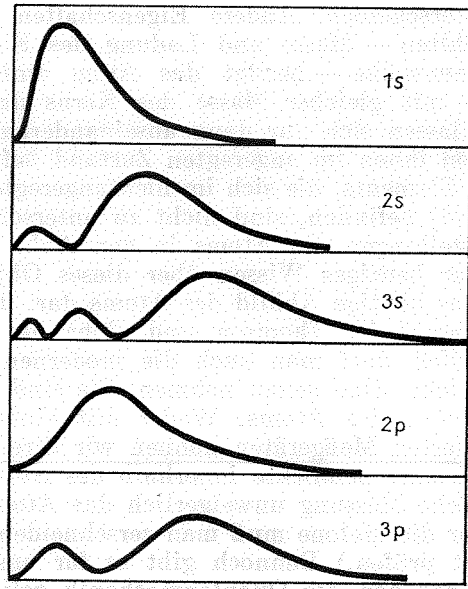

Abb. 41. Radiale Elektronenverteilung beim Wasserstoffatom

gungen lassen sich durch genaue quantenmechanische Berechnungen stützen, deren Ergebnisse mit den entsprechenden Meßwerten übereinstimmen.

Für uns ist jedoch ein anderes Problem wichtiger: Warum sind wir davon überzeugt, daß das von uns geschaffene Abbild des Atoms der Wahrheit entspricht?

Die Wahrheit der Quantenmechanik

Was versteht man unter »Wahrheit« in der Quantenmechanik? Würde hier die Rede von Melonen sein, so wäre wiederum alles einfach. Wir würden sogleich sagen, daß die Kenntnis der spezifischen Dichte der Melone bei weitem nicht ausreicht, um die Melone zu beschreiben. Erst wenn wir die Melone sehen, anfassen und sie essen, können wir sagen, was sie denn eigentlich darstellt. Doch selbst ein solches Wissen, das nach Meinung der meisten Leute vollständig ausreicht, ist für die Wissenschaftler erst der Anfang. Die Wissenschaftler werden die Melone unter dem

Mikroskop betrachten und die Zellen feststellen, aus denen sie besteht. Dann werden sie erklären, daß die Zelle aus Molekülen gebildet wird und die Moleküle aus Atomen aufgebaut sind. Der Kreis hat sich damit geschlossen. Um die Frage »Was ist eine Melone?« bis zum Ende zu beantworten, müssen wir auch die Antwort auf die Frage »Was ist ein Atom?« kennen.

In Wirklichkeit brauchen wir jedoch die vollständige Antwort auf die Frage »Was ist eine Melone?« nicht zu wissen, um uns darüber untereinander verständigen zu können. Der Begriff »Melone« bildete sich viele Jahrhunderte vor dem Beginn jeglicher Wissenschaft heraus und hängt nur gering von den heutigen und künftigen Ergebnissen der Wissenschaft ab, weil er nur auf unseren Wahrnehmungen beruht. Er kann sich nur dann ändern, wenn plötzlich alle Menschen über einen sechsten Sinn verfügten. Da wir dies als unreal ansehen, sperchen wir auch leichten Herzens davon, daß wir wissen, was eine Melone ist, nachdem wir sie mit Hilfe unserer fünf Sinnesorgane untersucht haben. (Erinnern wir uns nur daran, wie wir eine Melone einkaufen. Zunächst wählen wir eine mit den Augen aus, dann nehmen wir sie in die Hand und führen sie zuweilen ans Ohr, um ihren »Klang« zu überprüfen.)

Kann man mit diesem Maß auch an den Begriff »Atom« herantreten? Die Zahl der Experimente, auf deren Grundlage wir das Abbild und den Begriff »Atom« schaffen, ist unendlich, und im Prinzip fügt jeder Versuch unserem Wissen irgend etwas Neues hinzu. Wir können auf diesem Weg nicht stehenbleiben und sagen, daß wir uns schon ein Abbild vom Atom verschafft haben und weitere Experimente dieses Abbild nur wieder zerstören würden. In Wirklichkeit ist gerade das Gegenteil der Fall. Wir freuen uns über jedes gelungene neue Experiment und hierbei besonders über jene, die nicht in den Rahmen der von uns erdachten Abbilder hineinpassen. Gerade derartige Versuche waren es, die uns halfen, die Vorstellung von den Atomen als feste Kügelchen zu überwinden und an ihre Stelle eine bessere zu setzen. Warum sind wir jetzt davon überzeugt, daß das heutige Abbild vom Atom der Wirklichkeit entspricht?

Offen gesagt, die Physiker sind davon ganz und gar nicht überzeugt. Sie können nur ehrlichen Herzens sagen, daß in den letzten fünfzig Jahren kein Versuch durchgeführt wurde, der dem von ihnen geschaffenen Bild widerspräche.

Darum wollen wir nicht davon reden, inwieweit es der Wirklichkeit entspricht, sondern über seine Anwendbarkeit. Wir wollen uns darüber unterhalten, wie diese Vorstellung vom Atom uns hilft, die Besonderheiten der atomaren Erscheinungen zu erklären und vorauszusagen.

Hierbei stellt sich eine erstaunliche Sache heraus. Wir brauchen nicht unbedingt zu wissen, wie das Atom in Wirklichkeit aussieht. Es genügt vollkommen, die Gleichungen der Quantenmechanik zu studieren und zu lernen, wie man mit ihnen umgeht. Können wir dies, so vermögen wir alles vorauszusagen, beispielsweise die Farbänderung eines Körpers bei seiner Erwärmung; die Spektrallinien, die er dabei aussendet; sowie die Änderung der Wellenlänge seiner Strahlung, wenn der Körper in ein elektrisches oder magnetisches Feld gebracht wird. Wir können schließlich auf ihrer Grundlage auch ein Atomkraftwerk und einen Atomeisbrecher bauen, und diese werden zuverlässig arbeiten. All das ist möglich, ohne sich dabei auf die »wirkliche« Form des Atoms berufen zu müssen.

Daraus ziehen viele den Schluß, daß es in der Quantenmechanik generell nicht nötig ist, mit anschaulichen Vorstellungen zu operieren. Die Nützlichkeit einer solchen Auffassung läßt sich bestreiten, doch kann man sie nicht von vornherein verneinen. Auf die Frage »Was ist ein Atom?« antworten die Anhänger dieser extremen Richtung nur lakonisch: »Das Atom ist ein System von Differentialgleichungen.« Leider steckt in diesem Scherz viel Wahrheit. Im Vergleich mit der Melone ist das »Atom der Melone« sehr arm an Eigenschaften. Diese Eigenschaften sind widersprüchlich und lassen sich z.Z. ohne Mißachtung der Mathematik und des gesunden Menschenverstandes nur in den Gleichungen der Quantenmechanik zusammenfügen.

Die Quantenmechanik bildet ein mathematisches Schema, das uns gestattet, die physikalisch meßbaren Charakteristika der atomaren Erscheinungen zu berechnen, die Energieniveaus der Atome, die Intensität und Frequenz der Spektrallinien, die Aufspaltung der Spektrallinien im elektrischen und magnetischen Feld und noch vieles andere.

Wenn die Aufgabe der Physik allein darin bestünde, dann könnte man die Mechanik des Atoms als abgeschlossen ansehen. Die Physik ist jedoch dazu berufen, uns mehr zu geben — ein rationales Weltbild. Dieses Programm läßt

sich nicht allein mit Formeln und Zahlen verwirklichen; darüber hinaus ist es notwendig, Abbilder zu finden sowie Begriffe zu formulieren, die diesen Abbildern entsprechen. Besonders interessant ist das für den Nichtphysiker, der die Formeln der Quantenmechanik nicht kennt und nicht versteht. Für ihn ist die Sprache der Abbilder und Begriffe die einzige Methode, um in die Tiefe der Welt der Atome einzudringen. Auf diesem Weg sind wir schon ziemlich weit vorangeschritten und haben für uns schon ein recht befriedigendes Bild vom Atom entworfen. An seiner Vollständigkeit fehlen allerdings noch einige Striche.

Wir wissen bereits, daß der »Welle-Teilchen-Dualismus« die Haupteigenschaft aller atomaren Erscheinungen ist. Wenn nun behauptet wird, daß das Elektron im Atom eine Ladungswolke darstellt, so trägt dies vor allem dem Wellencharakter des Atoms Rechnung. Für das Verständnis der meisten Versuche ist ein solches Bild ausreichend und bequem, doch läßt sich mit seiner Hilfe der Photoeffekt prinzipiell nicht erklären. Noch niemals wurde bisher festgestellt, daß aus dem Atom ein Stück der Elektronenwolke herausfliegt, sondern immer nur, daß ein einziges und unteilbares Elektron das Atom verläßt. Wie geht die augenblickliche Vereinigung der Elektronenwolken verschiedener Form in stets ein und dasselbe unteilbare Teilchen vonstatten?

Um diese Frage zu beantworten, muß man einen neuen Begriff einführen, die Wahrscheinlichkeit. Er ist so grundlegend, daß ohne ihn die moderne Quantenmechanik nicht denkbar wäre.

Rund um das Quant

Das Atommodell Boskovichs

Roger Boskovich (1711—1787) ist heute nur einem kleinen Kreis von Spezialisten bekannt, doch zu Anfang des vorigen Jahrhunderts war er berühmt, und seine Atomtheorie beeinflußte sogar die Weltanschauung so bedeutender Leute wie Faraday und Maxwell.

Boskovich wurde im Gebiet des heutigen Jugoslawien, in Dubrovnik (damals Ragusa), geboren. Schon während seines Studiums am Collegium Romanum zeichnete er sich durch außergewöhnliche Fähigkeiten in Mathematik, Physik und

Astronomie aus. Im Jahre 1736 publizierte er seine erste wissenschaftliche Arbeit, eine Abhandlung über den Sonnenäquator und die Umlaufzeit der Sonne. 14 Jahre lang lehrte er Physik und Mathematik am Collegium Romanum. Er erforschte in dieser Zeit die Aberration des Lichtes sowie die Gestalt der Erde.

Unter den wenigen Wissenschaftlern, die im 18. Jahrhundert an die Atome glaubten, war Boskovich der einzige, der sich die Atome nicht als feste Kügelchen vorstellte. Daher sind uns seine Ansichten näher als alle Atomtheorien des 19. Jahrhunderts.

Sein Mißtrauen gegenüber den starren Atomkügelchen begründete er damit, daß sich mit Hilfe solcher Atome niemals die kristalline Struktur der Körper und ihre Elastizität, das Schmelzen fester Substanzen, das Verdampfen von Flüssigkeiten und erst recht nicht die chemischen Reaktionen zwischen den Stoffen, die aus solchen festen und undurchdringlichen bestehen, erklären lassen.

Boskovich stellte sich das Atom als ein Kräftezentrum vor, wobei sich die Kräfte in Abhängigkeit vom Abstand zum Zentrum ändern. Nahe dem Zentrum haben die Kräfte abstoßenden Charakter, was einem gegenseitigen Abstoßen der Atome bei starker Annäherung oder beim Zusammenprall entspricht. Mit zunehmender Entfernung vom Zentrum verringert sich die abstoßende Kraft und wird schließlich gleich Null. Bewegt man sich noch weiter weg, so wird aus der abstoßenden Kraft eine anziehende Kraft. Boskovich vertrat die Auffassung, daß sich in diesem Moment die festen und flüssigen Körper bilden. Entfernen wir uns noch weiter vom Zentrum, so werden die Kräfte wieder abstoßend. Das heißt nach den Vorstellungen Boskovichs, daß hier die flüssigen Körper zu verdampfen beginnen. In sehr großer Entfernung vom Zentrum sind die Kräfte von anziehendem Charakter, wie dies ja auch das Gravitationsgesetz fordert.

Somit erstrecken sich die Boskovichschen Atome bis ins Unendliche. Da die Kräftezentren weder vernichtet noch geschaffen werden können, sind diese Atome ebenso ewig wie die Atome Demokrits.

Die Vorstellungen Boskovichs über das Atom sind den heutigen Auffassungen bedeutend näher als die Demokrits. Wie das heutige Atommodell, so besitzt auch das Boskovichsche Atom keine bestimmten geometrischen Ausmaße.

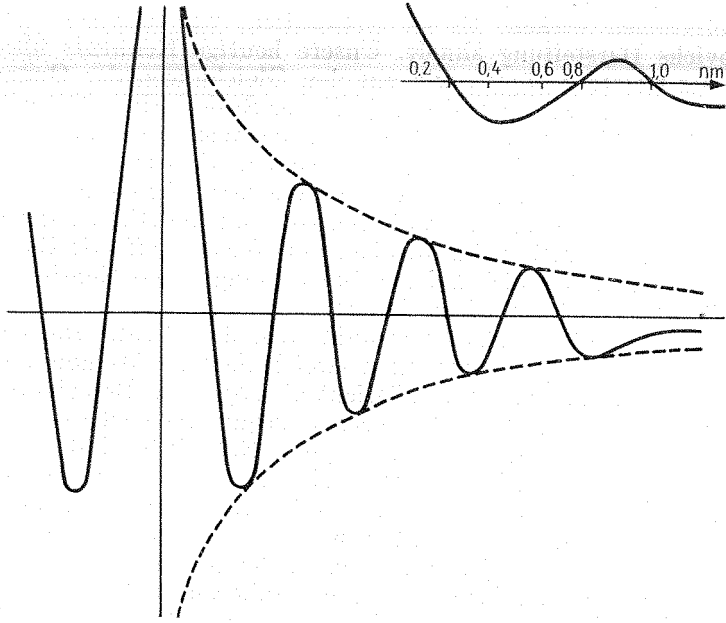

Abb. 42. Boskovichs Atommodell

Dafür lassen sich aber mit seiner Hilfe die Mannigfaltigkeit der Kristallformen und alle denkbaren chemischen Umwandlungen, an denen diese Atome teilnehmen, prinzipiell verstehen.

Betrachten wir die folgende Abbildung, die nach einer Darstellung in Boskovichs Buch »Theorie der Naturphilosophie« (1757/58) gezeichnet wurde. Sie stellt die Beziehung für die Änderung der Kräfte dar, so wie es sich Boskovich vorstellte. Natürlich besitzen die Vorstellungen von Boskovich spekulativen Charakter. Sie basieren weder auf dem genauen Experiment noch auf strenger mathematischer Analyse, sondern haben allein im gesunden Menschenverstand und in der aufmerksamen Beobachtung der Natur ihren Ursprung. Boskovich schrieb selbst darüber: »Es gibt jedoch gewisse Dinge, die mit dem Gesetz für die Kräfte in Verbindung stehen, bezüglich derer wir alle unwissend sind.«

Neben Boskovichs Zeichnung ist die Kurve für die Änderung der Kräfte abgebildet, die zwischen zwei Wasser-

stoffatomen wirken. Es ist erstaunlich, wie sehr sie Boskovichs Darstellung ähnelt. Unsere heutige Kenntnis über dieses Gesetz schöpfen wir aus den Gleichungen der Quantenmechanik, sie ist frei von jeglicher Spekulation. Mit seiner Hilfe können wir die Spektren des Wasserstoffmoleküls voraussagen und die Energie berechnen, die wir benötigen, um die zwei Wasserstoffatome des Wasserstoffmoleküls voneinander zu trennen. Des weiteren ist es uns möglich, vorauszusagen, was z.B. beim Mischen von Wasserstoff mit Chlor passiert und was sich bei der Bestrahlung dieses Gemisches mit ultraviolettem Licht ändert.

Die Quantenmechanik erlaubt uns, das Gesetz von der Änderung der Kräfte zwischen zwei beliebigen Atomen auszurechnen. Im Prinzip ermöglicht sie sogar die Berechnung der Form der Kristalle. Sie vermag sogar, die Farbe chemischer Verbindungen vorauszusagen. Natürlich sind diese Dinge nur denjenigen zugänglich, die sicher die relativ schwierige Mathematik der Atomphysik beherrschen. Viele Besonderheiten der Struktur und der Eigenschaften der Stoffe kann jedoch jeder verstehen, der nur ein wenig mit den Vorstellungen der Quantenmechanik vertraut ist.

Wir haben mehrfach wiederholt, daß sich die Gleichungen der Quantenmechanik von den Gleichungen der klassischen Mechanik deutlich unterscheiden. Deshalb kann man die Bewegung von Quantenobjekten mit klassischen Begriffen und Vorstellungen weder beschreiben noch darstellen. Aber obgleich wir uns Quantenbewegungen nicht vorzustellen vermögen und obgleich es unklar ist, wie man Koordinate und Impuls eines Elektrons verstehen soll, so ist doch genau bekannt, daß die Mittelwerte der Quantengrößen den Gleichungen der klassischen Mechanik gehorchen. Darin besteht das Wesentliche des Korrespondenzprinzips, das Niels Bohr formulierte und das im Jahre 1927 von Paul Ehrenfest (1880—1933) bewiesen wurde.

Vorschriften für den Zufall

Stellen wir uns vor, daß wir irgendwo auf einer Reise die Bekanntschaft eines sympathischen Menschen gemacht haben und daß wir ihn ein Jahr später zufällig im Dresdener Zwinger wieder treffen. Wie sehr wir uns auch über die Begegnung freuen, zunächst einmal wundern wir uns, da wir aus Erfahrung wissen, wie wenig wahrscheinlich ein solches Ereignis ist.

Wir gebrauchen ständig die Worte »wahrscheinlich«, »am wahrscheinlichsten«, »aller Wahrscheinlichkeit nach« und »unwahrscheinlich«, ohne daß wir uns dabei Rechenschaft darüber geben, wie streng die Begriffe definiert sind, die mit diesen Worten bezeichnet werden. In der Physik ist ein solches Herangehen unzulässig, da hier dem Begriff »Wahrscheinlichkeit« nur dann ein Sinn zugeschrieben werden darf, wenn wir ihn quantitativ definieren können.

Das ist nicht immer möglich. Beispielsweise ist es ausgeschlossen, die Wahrscheinlichkeit dafür anzugeben, daß wir uns zufällig mit unserem Bekannten am 23. Oktober 1975 um 18.00 Uhr in Leipzig an der Hauptpost treffen werden, obgleich von vornherein klar ist, daß diese Wahrscheinlichkeit ungleich Null ist.

Die Handlungen der Menschen aber sind nicht vollkommen zufällig. Auf sie läßt sich die Wahrscheinlichkeitstheorie nicht anwenden. Darum werden in allen entsprechenden Büchern die Wahrscheinlichkeitsgesetze am Beispiel des Münzwurfs erklärt.

Zahl oder Wappen?

Halten wir vor allem zunächst folgende Tatsache fest: Besitzt ein Ereignis mehrere Ausgänge, dann ist seine Gesamtwahrscheinlichkeit, d.h. die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines beliebigen seiner möglichen Ausgänge gleich Eins, da ja irgendein Ausgang immer, also unbedingt, erfolgen muß. Daher bedeuten die Worte »das Ereignis geht

mit der Wahrscheinlichkeit gleich Eins vonstatten«, daß es ganz gewiß passiert.

Demnach ist die Wahrscheinlichkeit für einen bestimmten Ausgang eines Ereignisses immer kleiner als Eins. Im Beispiel des Knobelns mit einer Münze sieht das so aus: Das zufällige Ereignis ist hier das Werfen der Münze. Dieses Ereignis besitzt zwei mögliche Ausgänge. Entweder liegt die Münze mit der Zahl oder mit dem Staatsemblem nach oben. (Wir haben dabei den unwahrscheinlichen Fall der hochkant stehenden Münze ausgeschlossen.) Wenn die Münze auf ganz gewöhnliche Weise hergestellt worden ist, dann ist es logisch, anzunehmen, daß beide Ausgänge des Münzwurfes gleich wahrscheinlich sind. Hieraus folgt sofort für die Wahrscheinlichkeit des Erscheinens der Zahl der Wert $\frac{1}{2}$.

Genauso leicht kann man die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer bestimmten Zahl beim Würfelspiel berechnen. Sie ist offensichtlich gleich $\frac{1}{6}$.

Die Reihe derartiger Beispiele läßt sich leicht fortsetzen. Sie zeichnen sich alle durch nachstehende gemeinsame Kennzeichen aus:

1. Jedes folgende Ereignis (z.B. jeder folgende Wurf der Münze) hängt nicht vom vorangegangenen ab.
2. Die Ereignisse sind streng zufällig, d.h., wir kennen nicht alle Gründe (oder vermögen sie nicht zu berücksichtigen), die zu diesem oder jenem Ausgang des Ereignisses führen.

Die zweite Eigenschaft ist besonders wichtig. Tatsächlich, die Münze ist kein atomares Teilchen, und ihre Bewegung gehorcht den bekannten Gesetzen der klassischen Mechanik. Würden wir sie benutzen, so wären wir imstande, von vornherein alle Details der Bewegung der Münze anzugeben und genau vorherzusagen, wie die Münze auf dem Boden liegen wird, mit der Zahl oder dem Wappen nach oben. Wir können sogar die Bahnkurve ihrer Bewegung zeichnen. Natürlich ist dieses Unterfangen schwierig. Man muß den Luftwiderstand berücksichtigen, die Form der Münze, die Elastizität des Bodens, auf den die Münze fällt, und noch viele weitere wichtige Kleinigkeiten. Weiterhin — und das ist die Hauptsache — muß man genau die Anfangsbedingungen für die Münze angeben, d.h. ihre Anfangslage und ihren Anfangsimpuls.

Nicht immer ist es jedoch möglich, alle nur denkbaren Faktoren zu berücksichtigen, die auf den Ausgang des Ereignisses einen Einfluß haben. Beim Münzwurf z.B. wissen wir niemals ausreichend genau die Anfangslage und Anfangsgeschwindigkeit der Münze. Jede Störung dieser Anfangsbedingungen kann, selbst wenn sie äußerst gering ist, das Ergebnis des Münzwurfs in das Gegenteil umwandeln. Deswegen kann man nicht davon überzeugt sein, daß bei einem bestimmten Wurf die Münze mit der Zahl nach oben liegen wird. Es läßt sich nur sagen: Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Zahl oder des Wappens bei einem beliebigen Wurf ist gleich $\frac{1}{2}$.

Die einfachen Beispiele, die wir hier anführten, erklären vorläufig noch nicht, warum der Begriff »Wahrscheinlichkeit« in der Quantenmechanik so wichtig ist. Doch ehe wir dazu übergehen, wollen wir uns noch kurz mit den Grundgesetzen der Wahrscheinlichkeitstheorie bekannt machen. Die Gesetze des Zufalls sind — ungeachtet der eigenartigen Zusammenstellung dieser beiden Wörter — ebenso streng wie alle anderen mathematischen Gesetze. Sie besitzen allerdings einige ungewöhnliche Besonderheiten und gelten nur in einem ganz bestimmten Anwendungsgebiet.

So sind wir außerstande, den Ausgang eines einzelnen Münzwurfes vorauszusagen, obgleich wir wissen, daß die Wahrscheinlichkeit für das Erscheinen des Wappens gleich $\frac{1}{2}$ ist. Dennoch läßt sich leicht überprüfen, daß nach einer großen Anzahl von Würfen das Wappen ungefähr bei der Hälfte aller Würfe aufgetreten ist. Dieses Gesetz erfüllt sich um so genauer, je größer die Anzahl der erfolgten Würfe ist. Die wesentliche Besonderheit der Wahrscheinlichkeitsgesetze besteht darin: Der Begriff der Wahrscheinlichkeit ist anwendbar auf ein einzelnes Ereignis, und wir können im voraus die Zahl berechnen, die ihm entspricht. Messen kann man diese Zahl jedoch erst durch eine oftmalige Wiederholung gleicher Ereignisse.

Es ist sehr wichtig, daß es sich hierbei immer um gleiche Ereignisse handelt, d.h. um Ereignisse, die voneinander nicht zu unterscheiden sind, da nur in diesem Falle die gemessene Zahl — die Wahrscheinlichkeit — als Charakteristik für das Auftreten eines bestimmten Ausganges des Ereignisses genommen werden kann.

Die ungewöhnlichen Besonderheiten der Zufallsgesetze haben eine natürliche Erklärung. Das Werfen einer Münze stellt einen sehr komplizierten Vorgang dar. Wir wollen bzw. können nicht alle seine Kompliziertheiten in Rechnung stellen. Darum verschließen wir vorsätzlich vor diesen Schwierigkeiten die Augen, verzichten auf die Verfolgung der Bahnkurve der Münze und wollen nur das Resultat des Wurfes wissen. Eine derartige Vernachlässigung der Details des Prozesses hinterläßt ihre Spuren — jetzt können wir nur das mittlere Ergebnis mehrfach durchgeführter gleicher Versuche mit Gewißheit voraussagen, für jedes einzelne Ereignis hingegen vermögen wir nur seinen wahrscheinlichen Ausgang anzugeben.

Weit verbreitet ist der Irrtum, daß eine Beschreibung der Bewegung mittels der Wahrscheinlichkeitsrechnung weniger vollständig sei als die klassische, streng kausale Beschreibung mit ihrem Begriff der Bahnkurve. Vom Standpunkt der klassischen Mechanik verhält es sich tatsächlich so. Verzichten wir jedoch teilweise auf ihre strengen Forderungen, z.B. auf die genaue Kenntnis der Anfangslagen und der Anfangsgeschwindigkeiten, dann erweist sich die klassische Beschreibung als nutzlos. An ihre Stelle tritt jetzt die auf den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitstheorie beruhende. Unter den neuen Bedingungen ist diese Methode vollständig, denn sie liefert uns alle Angaben über das System, die wir im allgemeinen mit Hilfe des Experiments gewinnen können.

Das Schießen auf die Zielscheibe

Beim Spiel mit der Münze — Zahl oder Wappen? — interessieren wir uns absichtlich nicht für die Anfangslage und Anfangsgeschwindigkeit der Münze und verlassen uns ganz auf den Zufall. Auf einem Schießstand dagegen haben wir ein ganz anderes Ziel. Dort streben wir immer danach, ins Zentrum der Zielscheibe zu treffen. Doch dessen ungeachtet wissen wir im voraus niemals, an welcher Stelle der Zielscheibe die Kugel auftrifft. Die Treffer gruppieren sich in einem ziemlich exakten Oval, das man auch die »Streuellipse« nennt.

Damit alle Kugeln, die aus einem Gewehr herausfliegen, immer in ein und denselben Punkt der Zielscheibe treffen, müßten sie alle im Moment des Losfliegens ein und dieselbe

Anfangskoordinate x und die gleiche Anfangsgeschwindigkeit v besitzen. Dies ist aber nur dann möglich, wenn wir fehlerfrei zielen und außerdem die Pulverladung in allen Patronen immer ganz genau gleich ist.

Weder das eine noch das andere ist gewöhnlich erreichbar. Darum gehorchen die Einschüsse auf der Zielscheibe immer den Wahrscheinlichkeitsgesetzen. Es hat deshalb nur Sinn, davon zu sprechen, wie groß z.B. die Wahrscheinlichkeit dafür ist, eine »Zehn« oder eine »Neun« zu schießen.

Wie auch beim Knobeln mit der Münze läßt sich diese Wahrscheinlichkeit messen. Nehmen wir an, daß wir 100 Schüsse abgeben und davon 40mal eine »Zehn«, 30mal eine »Neun«, 15mal eine »Acht« usw. erreichen. Die Wahrscheinlichkeit, eine »Zehn«, eine »Neun«, eine »Acht« usw. zu treffen, ist dann

$$W(10) = \frac{40}{100} = 0{,}4; \quad W(9) = 0{,}3; \quad W(8) = 0{,}15 \text{ usw.}$$

Man kann sogar ein Diagramm zeichnen, das die innere Struktur der Streuellipse zeigt.

Wenn wir nun auf eine gleiche Zielscheibe noch einmal 100 Schüsse abgeben, dann wird die Lage der Einschüsse eine völlig andere sein als beim ersten Versuch. Die Zahl der »Zehnen«, »Neunen« usw. wird jedoch ungefähr die gleiche sein, wenn die gleichen Bedingungen herrschen. Das Diagramm der Streuellipse bleibt somit fast ohne jede Änderung.

Natürlich ist die Streuellipse für verschiedene Schützen unterschiedlich. Bei einem erfahrenen Schützen ist sie viel enger als bei einem Anfänger. Für jeden einzelnen Schützen bleibt sie jedoch unveränderlich, solange er dasselbe Gewehr verwendet und seine individuellen Fähigkeiten nicht verbessert u.a. Ein erfahrener Trainer vermag daher allein aus dem Trefferbild festzustellen, welcher von seinen Schülern geschossen hat.

Aus den angeführten einfachen Beispielen folgt, daß die Formulierung »Gesetze des Zufalles« keine leere Wortspielerei darstellt. Natürlich trifft jede einzelne Kugel in einen zufälligen Punkt auf der Zielscheibe, der sich im voraus nicht angeben läßt. Bei einer großen Zahl von Schüssen bilden die Treffer jedoch ein derartig gesetzmäßiges Bild, daß wir es als genau ansehen und den Wahrscheinlichkeitscharakter, der ihm zugrunde liegt, völlig vergessen.

Das einfache Beispiel vom Schießen erinnert an die Versuche der Quantenmechanik in weitaus größerem Maße, als es zunächst angenommen werden könnte. Um uns davon zu überzeugen, ersetzen wir das Gewehr durch die »Elektronenkanone«, die Zielscheibe durch eine Fotoplatte und befestigen zwischen beiden eine dünne Metallfolie.

Der Ausdruck »Elektronenkanone« ist kein Scherz, sondern ein wissenschaftlicher Terminus, der ein Gerät zur Herstellung eines Bündels von Elektronenstrahlen bezeichnet. Dieses Gerät ist ähnlich konstruiert wie die Elektronenröhre im Fernsehapparat. Aus dem Strahlenbündel können wir mit Hilfe von Blenden und fokussierenden Linsen einen sehr schmalen Elektronenstrahl heraustrennen, in dem sich alle Elektronen mit gleicher Geschwindigkeit bewegen.

Nun richten wir diesen Strahl so auf die Fotoplatte, daß er durch die Metallfolie hindurch muß. Danach entwickeln wir die Platte. Welche Abbildung werden wir auf ihr vorfinden? Einen Punkt? Eine Ellipse? Die Antwort ist uns schon lange bekannt. Auf der Fotoplatte sehen wir Beugungsringe (Abb. 43). Jetzt können wir auch den Grund für ihr Auftreten angeben.

Wie wir bereits mehrmals unterstrichen haben, ist das Elektron nicht nur Teilchen, sondern auch Welle. Daher darf uns die Beugung der Elektronen nicht verwundern. Die Beugung tritt immer dann auf, wenn eine Welle durch eine Substanz hindurchläuft. Welche Welle geht gemeinsam mit dem Elektron durch die Folie?

Auf dem Meer spielen Wellen, die vom Wasser gebildet werden. Aus dem Kosmos dringen elektromagnetische Wellen ein. Sie stellen Schwingungen des elektrischen und magnetischen Feldes dar. Woraus besteht nun aber die Welle des Elektrons, wenn das Elektron selbst unteilbar ist und keine innere Struktur besitzt?

Ehe wir auf diese Frage antworten, wollen wir das Experiment mit dem Elektronenstrahl in etwas abgewandelter Form wiederholen. Wir lassen jetzt die Elektronen einzeln (wie die Kugeln aus dem Gewehr) heraustreten und wechseln dabei jedesmal die Fotoplatte hinter der Folie. Wenn wir alle Fotoplatten entwickelt haben, werden wir auf jeder einen Punkt feststellen — die Spur von dem angekommenen

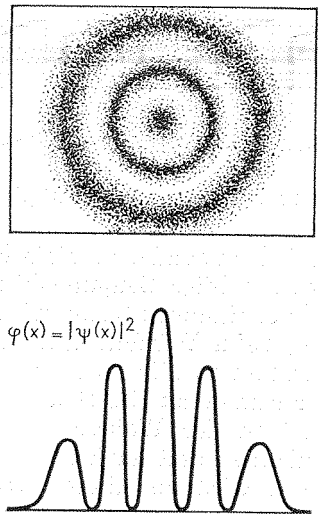

Abb. 43. Beugungsbild und Verteilungsfunktion von Elektronen

Elektron. (Schon allein dieser Fakt überzeugt uns leicht von den Teilcheneigenschaften des Elektrons.) Auf den ersten Blick scheinen die Punkte völlig willkürlich zu liegen und überhaupt nicht an das bekannte Beugungsbild zu erinnern. Legen wir nun aber alle Platten übereinander und schauen sie uns so alle zusammen an, dann werden wir mit Verwunderung die Beugungsringe erblicken. Die Spuren der Elektronen auf den einzelnen Platten sind demnach doch nicht völlig willkürlich angeordnet.

Dieser Versuch ist derart einfach, daß sich vielleicht manche darüber wundern. Als man ihn durchführte, überzeugten seine Ergebnisse auch die letzten Gegner der Quantenmechanik von deren Richtigkeit. In diesem Experiment besteht natürlich überhaupt keine Notwendigkeit, für jedes Elektron eine Fotoplatte zu nehmen. Um das gleiche Resultat zu erhalten, genügt es vollkommen, die Elektronen einzeln auf eine Platte zu schießen.

Genau wie früher können wir auch bei diesem Versuch nicht voraussagen, in welchem Punkt der Fotoplatte das Elektron auftrifft. Dieser Vorgang ist ein zufälliges Ereig-

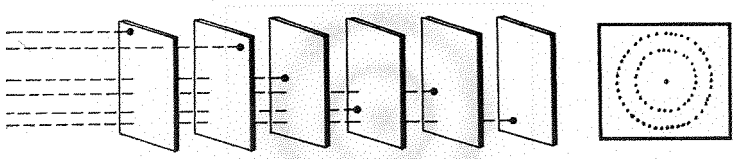

Abb. 44. Entstehung des Beugungsbildes (Gedankenversuch)

nis. Betrachten wir jedoch genügend viele Elektronen, dann erhalten wir das gesetzmäßige Beugungsbild (Abb. 44).

Mit derartigen Erscheinungen trafen wir schon beim Knobeln mit der Münze, beim Würfeln und beim Schießen auf eine Zielscheibe zusammen. Die Analogie mit diesen Dingen führt uns zu der Annahme: Die Beugung der Elektronen unterliegt den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Bei weiterem Nachdenken und nach dem Kennenlernen der Ideen von Max Born wird aus dieser Vermutung Gewißheit.

Die Wahrscheinlichkeitswellen

Max Born (1882—1970) verfolgte mit großer Aufmerksamkeit die Entwicklung der Atomtheorie, und er gehörte zu den ersten, die der Heisenbergschen Idee eine strenge mathematische Formulierung gaben. Zu Anfang des Jahres 1927 interessierte er sich besonders für die Versuche zur Elektronenbeugung.

Nach den de Broglieschen Arbeiten schien das Ergebnis dieser Versuche keinen Physiker mehr zu verwundern. Jeder Physiker vermochte mit Hilfe der Hypothese über die »Materiewellen« das Auftreten der Beugungsringe zu erklären. Mehr noch, nach der de Broglieschen Formel $\lambda = \frac{h}{mv}$ konnte er die Länge dieser Materiewellen ausrechnen und sich durch das Experiment von der Richtigkeit seines theoretischen Ergebnisses überzeugen. Allerdings vermochte nach wie vor niemand zu sagen, was unter dem Wort »Materiewellen« zu verstehen ist — eine pulsierende Elektronenkugel, die Schwingung eines Äthers oder die Vibration eines noch hypothetischeren Gebildes als der Äther.

Im Sommer des Jahres 1927 schlug Max Born folgendes Bild vor: Die Materiewellen sind einfach Wahrscheinlich-

keitswellen, die uns das wahrscheinliche Verhalten eines einzelnen Elektrons beschreiben, z.B. die Wahrscheinlichkeit für sein Auftreffen in einem ganz bestimmten Punkt der Fotoplatte.

Jede neue fundamentale Idee besitzt keine logischen Grundlagen, wenngleich sich auch immer gewisse Analogien, die zu ihr führten, verfolgen lassen. Darum wollen wir auch nicht die Rechtmäßigkeit der Bornschen Idee beweisen, was unmöglich ist, sondern nur ihre Natürlichkeit aufzeigen. Wenden wir uns dazu noch einmal dem »Zahl-oder-Wappen-Spiel« mit der Münze zu. Folgende Gründe zwangen uns, die Wahrscheinlichkeitstheorie darauf anzuwenden:

1. die vollständige Unabhängigkeit der einzelnen Würfe,
2. die vollständige Ununterscheidbarkeit der einzelnen Würfe,
3. die Zufälligkeit des Ausganges eines jeden einzelnen Wurfes, die ihre Ursache in der Unkenntnis der Anfangswerte eines jeden Wurfes hat, d.h. in der Unbestimmtheit der Anfangslage und der Anfangsgeschwindigkeit der Münze.

Diese drei Bedingungen sind auch bei den atomaren Erscheinungen erfüllt, insbesondere in den Streuexperimenten mit den Elektronen:

1. Die Elektronen sind trotz allem auch Teilchen, und jedes von ihnen wird unabhängig vom anderen gestreut.
2. Die Elektronen sind derart arm an Eigenschaften (Ladung, Masse, Spin — das sind alle), daß man sie in der Quantenmechanik nicht voneinander unterscheiden kann, und damit sind auch die einzelnen Streuprozesse voneinander nicht zu unterscheiden.
3. Die Anfangswerte für die Koordinaten und die Impulse der Elektronen lassen sich prinzipiell nicht genau bestimmen. Dies ist unmöglich entsprechend der Heisenbergschen Unschärferelation $\delta x \cdot \delta p \geqslant \frac{h}{2}$.

Unter solchen Bedingungen ist es sinnlos, nach der Bahnkurve für jedes einzelne Elektron zu suchen. Statt dessen müssen wir lernen, die Wahrscheinlichkeit $\rho(x)$ für das Auftreffen der Elektronen an einem bestimmten Ort x der Fotoplatte auszurechnen — oder, wie man in der Physik dazu sagt, die Verteilungsfunktion $\rho(x)$ anzugeben.

Bei der Frage »Zahl oder Wappen?« ist das sehr einfach. Sogar ohne Rechnungen findet man durch Nachdenken, daß

die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Wappens gleich $\frac{1}{2}$ ist. In der Quantenmechanik wird die Sache komplizierter. Um die Funktion $\rho(x)$ zu finden, die die Verteilung der Elektronen auf der Fotoplatte beschreibt, muß man die Schrödingergleichung lösen.

Max Born behauptete: Die Wahrscheinlichkeit $\rho(x)$ dafür, ein Elektron im Punkt x anzutreffen, ist gleich dem Quadrat der Wellenfunktion $\psi(x)$, in Zeichen

$$\rho(x) = |\psi(x)|^2.$$

Die Bornsche Hypothese läßt sich leicht überprüfen. Teilen wir dazu das Beugungsbild in konzentrische Kreise auf und numerieren wir sie (wie die Ringe auf der Zielscheibe). Des weiteren zählen wir die Zahl N_k der Elektronen, die in den Ring mit dem Radius x_k fallen, und teilen diese Zahl durch die Gesamtzahl der Elektronen, die auf die Fotoplatte fielen. Somit erhalten wir wie beim Zielschießen — eine Folge von Zahlen $\rho(x_k) = \frac{N_k}{N}$, die uns die Wahrscheinlichkeit dafür angeben, das Elektron in einer Entfernung x_k vom Zentrum des Spaltes anzutreffen. Nun fällt es nicht schwer, die Abhängigkeit der Verteilung der Elektronen auf der Fotoplatte vom Abstand zum Zentrum des Spaltes aufzutragen und daran zu verfolgen, wie sich die Anzahl der Elektronen bei zunehmender Entfernung vom Zentrum ändert.

Die Darstellung der Funktion $\rho(x)$ ist komplizierter als das Diagramm für die Streuellipse beim Schießen. Wenn wir auch die Streuellipse nicht voraussagen können, die Funktion $\rho(x)$ dagegen läßt sich vorher berechnen. Ihr Aussehen wird eindeutig durch die Gesetze der Quantenmechanik bestimmt, die trotz ihrer Ungewöhnlichkeit bekannt sind. Derartiges ist aber mit Sicherheit nicht der Fall beim Verhalten des Schützen, das die Streuellipse wesentlich mitbestimmt.

Woraus besteht die Elektronenwelle?

Wenn wir am Meeresufer stehen, dann zweifeln wir nicht daran, daß es Wellen sind, die an das Ufer schlagen. Genausowenig verwundert uns die Tatsache, daß alle Meereswellen aus vielen Teilchen bestehen, hauptsächlich aus den Wassermolekülen.

Die Wahrscheinlichkeitswellen besitzen die gleiche Realität wie die Meereswellen. Der Umstand, daß die Wahrscheinlichkeitswellen aus einer großen Anzahl einzelner, voneinander unabhängiger und zufälliger Ereignisse aufgebaut sind, darf uns hierbei nicht verwirren.

Das Meer besitzt gleichzeitig sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften. Diese Tatsache scheint uns völlig natürlich. Wenn wir uns nun über die Teilcheneigenschaften bei den Wahrscheinlichkeitswellen wundern, so ist dies zumindest unlogisch.

Um sich von der Realität der Meereswellen zu überzeugen, braucht man nur auf das Meer zu blicken. Für die Beobachtung der Wahrscheinlichkeit benötigt man komplizierte Meßapparaturen und spezielle Experimente. Natürlich sind diese Versuche schwieriger zu bewerkstelligen, als von einer Felsenklippe am Meeresufer den Strand oder den Horizont zu beobachten, doch ist das kein Grund, die Existenz der Wahrscheinlichkeitswellen abzulehnen. Beim Lesen von Büchern über Hydrodynamik überzeugt man sich leicht davon, daß die Bahnen der Moleküle, aus denen die Wasserwelle besteht, in nichts an Wellenbewegungen erinnern. Die Moleküle bewegen sich auf Kreisen und Ellipsen herauf und herunter und beteiligen sich überhaupt nicht an der Vorwärtsbewegung. Wir sehen, die Welle setzt sich aus Molekülen zusammen, doch folgen die Moleküle nicht der Bewegung der Welle. Die Form der Welle wird durch die Gesetze der Hydrodynamik bestimmt.

Die Bewegung der einzelnen Elektronen im Atom ist gleichfalls ganz und gar nicht den Schwingungen ähnlich, mit denen wir sie früher verglichen hatten. Die unbeobachtbaren Wege der Elektronen gehören einem einheitlichen Ensemble an — der Wahrscheinlichkeitswelle. Die Formen dieser Wellen werden von den Gesetzen der Quantenmechanik bestimmt.

Zuweilen wird der Wellencharakter der quantenmechanischen Erscheinungen als das Resultat irgendeiner mystischen Wechselwirkung zwischen einer großen Zahl von Teilchen interpretiert. Diese »Erklärung« wird damit motiviert, daß der Wellencharakter der Gesetzmäßigkeit atomarer Erscheinungen niemals zu beobachten ist, wenn man die Experimente mit einzelnen atomaren Teilchen durchführt. Der Fehler derartiger Überlegungen liegt in dem völligen Unverständnis der Natur der Wahrscheinlichkeitsgesetze.

Die Wellenfunktion $\psi(x)$ und die Wahrscheinlichkeitsverteilung $\rho(x)$ lassen sich für ein einzelnes Teilchen ausrechnen, doch messen kann man die Verteilung $\rho(x)$ nur mittels oftmaliger Wiederholung von gleichen Experimenten mit ein und demselben Teilchen. Dennoch ist die Wahrscheinlichkeit eine Charakteristik für ein einzelnes Ereignis.

Daher besitzt jedes Elektron Welleneigenschaften, wenngleich wir letztere auch immer nur an einem Bündel von Elektronenstrahlen beobachten können. (Eine solche Situation ist uns bereits vom Knobeln mit der Münze bekannt: Die Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{2}$ für das Erscheinen des Wappens ist eine Eigenschaft, die jedes einzelne Ereignis charakterisiert. Messen läßt sich diese Wahrscheinlichkeit aber nur durch eine große Anzahl von Würfen.)

Es fällt schwer, sich die moderne Quantenmechanik ohne den Begriff der Wahrscheinlichkeit vorzustellen. Das Vorhandensein von Wahrscheinlichkeitsgesetzen in der Quantenmechanik bildet einen der Hauptunterschiede zur klassischen Mechanik. Natürlich benutzt auch die klassische Physik ständig den Begriff der Wahrscheinlichkeit, z.B. in der kinetischen Theorie der Gase. Allerdings kann man sich hier mit der Hoffnung beruhigen, ohne die Wahrscheinlichkeitsrechnung auszukommen, wenn es gelingt, gleichzeitig eine sehr große Anzahl von Bewegungsgleichungen für die Gasmoleküle zu lösen. Die Quantenmechanik läßt keine derartigen Hoffnungen zu, ihre Gleichungen gestatten prinzipiell nur die Berechnung der Wahrscheinlichkeit von Ereignissen. Ungeachtet dessen wird diese Beschreibung für atomare Erscheinungen genauso vollständig sein wie die Beschreibung der klassischen (makroskopischen) Bewegung mit Hilfe der Bahnkurve.

Alle vorangegangenen Beispiele und Überlegungen helfen uns, zu verstehen, was das Elektron außerhalb des Atoms darstellt und warum dieses Teilchen auch über Welleneigenschaften verfügt. Wie lassen sich diese Eigenschaften — Welle und Teilchen — nun ohne logische Widersprüche innerhalb des Atoms vereinbaren?

Das Elektron im Atom

Bemerkenswerterweise haben wir nirgends versucht, die Form des Atoms unmittelbar durch das Experiment zu bestimmen. Wir berechneten sie mit Hilfe der Schrödinger-

gleichung. An die Richtigkeit dieser Gleichung glauben wir, da sie uns gestattet, die feinsten Besonderheiten der beobachtbaren Atomspektren richtig vorauszusagen. Heute wird diese im vorigen Kapitel erläuterte Gestalt der Atome allgemein anerkannt.

Wir haben bisher die angeführten Darstellungen des Atoms wie folgt interpretiert: Das Elektron muß man sich als eine Ladungswolke vorstellen, deren Form vom Anregungsgrad n des Atoms abhängt. Die Dichte der Ladungswolke $p_n(x)$ ist gleich $|\psi_n(x)|^2$. Aus verschiedenen Gründen jedoch ist ein solches Bild unbefriedigend.

Vor allem berücksichtigt es nicht den Teilchencharakter des Elektrons (trotz seiner Welleneigenschaften!). Von ihm überzeugt man sich leicht an Hand der schon behandelten Beugungsexperimente oder mittels der Spuren, die das Elektron in der Wilsonkammer hinterläßt. Weiterhin wissen wir bereits, daß im Atom keinerlei Schwingungen vor sich gehen. Real existieren nur die Wahrscheinlichkeitswellen. Wie ändert diese neue Erkenntnis unsere früheren Vorstellungen vom Atom?

Stellen wir uns dazu folgendes Gedankenexperiment zur Bestimmung der Gestalt des Wasserstoffatoms vor. Wir nehmen wiederum eine »Elektronenkanone«, doch beschießen wir jetzt mit ihr nicht eine Metallfolie, sondern ein einzelnes Wasserstoffatom. Was werden wir hierbei beobachten?

Die Mehrheit der Elektronen geht ungehindert durch das Atom hindurch, wie eine Gewehrsalve durch ein groblöchriges Metallsieb. Schließlich stößt doch eines dieser Elektronen mit dem Elektron des Wasserstoffatoms zusammen, reißt es aus dem Atom heraus und wird dabei selber vom ursprünglichen Weg abgelenkt. Jetzt werden wir hinter dem Atom nicht ein, sondern zwei Elektronen finden, eins aus der Elektronenkanone, das andere aus dem Atom. Nehmen wir eine derart genaue Messung ihres Weges an, daß wir imstande sind, ihren Zusammenstoßpunkt im Atom zu rekonstruieren. Können wir nun daraus schließen, daß sich das Elektron des Wasserstoffatoms gerade in diesem Punkt befand?

Nein, eine solche Schlußfolgerung läßt sich nicht ziehen. Wir vermögen nicht einmal, unsere Vermutung durch eine Wiederholung des Versuchs zu überprüfen, weil das Wasserstoffatom schon nicht mehr existiert. Unsere Messung hat es zerstört.

Doch dieser unerfreuliche Fakt läßt sich beheben. Alle Wasserstoffatome sind ununterscheidbar. Um den Versuch zu wiederholen, genügt es vollkommen, ein beliebiges Wasserstoffatom zu nehmen. Das nochmalige Experiment enttäuscht uns jedoch. Wir beobachten das Elektron ganz und gar nicht an der Stelle, wo wir es auf Grund der ersten Messung erwartet haben.

Weitere Versuche in dieser Richtung werden nur unsere Überzeugung festigen, daß das Elektron im Atom keine bestimmte Lage einnimmt. Jedesmal werden wir das Elektron an einer anderen Stelle vorfinden. Wenn wir nun sehr viele Atome untersuchen und bei jedem Versuch den Platz des Elektrons im Atom durch einen Punkt festhalten, dann werden wir mit Verwunderung bemerken, daß diese Punkte nicht willkürlich angeordnet sind, sondern sich zu den uns schon bekannten Figuren gruppieren, die wir mit Hilfe der Schrödingergleichung berechnet hatten.

Aus den Experimenten über die Elektronenbeugung wissen wir bereits, wie ein solcher Zustand sich erklären läßt. Wußten wir dabei nicht, an welchem Ort der Fotoplatte das Elektron auftrifft, so ist uns jetzt nicht bekannt, an welchem Platz im Atom wir das Elektron vorfinden. Wie früher sind wir auch jetzt nur in der Lage, die Wahrscheinlichkeit für die Beobachtung des Elektrons in irgendeinem bestimmten Ort innerhalb des Atoms anzugeben.

Für einen Punkt des Atoms ist diese Wahrscheinlichkeit größer, für einen anderen kleiner, doch insgesamt bildet die Wahrscheinlichkeitsverteilung gesetzmäßig eine Silhouette, die wir als die Gestalt des Atoms ansehen.

Etwas anderes bleibt uns nicht übrig. Es läßt sich natürlich gegen diese Auffassung einwenden, dieser Umriß repräsentiere kein einzelnes Atom, sondern stelle irgendein verallgemeinertes Abbild vieler Atome dar. Doch ist das ein schwaches Argument, denn alle Atome, die sich in ein und demselben Quantenzustand befinden, lassen sich nicht voneinander unterscheiden. Darum geben die Punkte, die durch die Streuung der Elektronen an vielen, ununterscheidbaren Atomen erhalten wurden, gleichzeitig sowohl die Form des verallgemeinerten Atoms als auch die Gestalt des einzelnen Atoms an.

Wie immer beim Umgang mit Zufallsgesetzen, so hat man auch hier ihre Besonderheiten in Betracht zu ziehen. Für jedes einzelne Atom gibt die Funktion $\rho(x)$ nur die

Wahrscheinlichkeitsverteilung dafür an, ein Elektron im Punkt x des Atoms vorzufinden. In diesem Sinne darf man »von der wahrscheinlichen Form eines einzelnen Atoms« sprechen. Doch das erhaltene Bild selbst ist genau, da es völlig eindeutig für eine beliebige Anzahl gleicher Atome ist.

Unser heutiges Bild vom Atom ist von den Demokritschen Vorstellungen sehr weit entfernt. Im Prinzip blieb von ihnen fast nichts mehr übrig.

Doch befruchtende Irrtümer sind immer besser als eine fruchtlose Unfehlbarkeit. Gäbe es derartige Fehler nicht, Kolumbus hätte niemals Amerika entdeckt.

Wir sind nunmehr an jener Grenze angelangt, die man bei dem Versuch, ohne Formeln und Gleichungen in die Tiefe des Atoms einzudringen überhaupt erreichen kann. Trotzdem ist das Abbild, das wir uns verschafft haben, in allen Details richtig. Ohne Mathematik sind wir außerstande, auch nur eine einzige atomare Erscheinung genau vorauszusagen, doch können wir einiges jetzt erklären, wenn wir das neue Abbild des Atoms richtig anwenden.

Die Wahrscheinlichkeit und die Atomspektren

Nicht nur die Form des Atoms, sondern alle in ihm vonstatten gehenden Prozesse unterliegen den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Wenn wir ein einzelnes Atom betrachten, dann läßt sich niemals mit Gewißheit sagen, wo sich sein Elektron befindet, wohin es sich im nächsten Augenblick bewegt und was dabei mit dem Atom selbst passiert.

Die Gleichungen der Quantenmechanik gestatten allerdings immer, die Wahrscheinlichkeiten für alle diese Prozesse auszurechnen. Die derart erhaltenen Wahrscheinlichkeitsaussagen lassen sich dann an Hand genügend vieler Experimente überprüfen. Man überzeugt sich hierbei von der Genauigkeit der Wahrscheinlichkeitsaussagen. Selbst Physiker vom Format eines Rutherford begriffen nicht sofort diese Spezifik atomarer Prozesse.

Rutherford war der erste, der das Manuskript der Bohrschen Arbeit über die Struktur der Atome las. Nachdem er sich damit vertraut gemacht hatte, fragte er Bohr mit der ihm eigenen Geradheit und Schärfe: »Woher weiß das Elektron, das auf der n-ten Bahn sitzt, denn nun eigentlich,

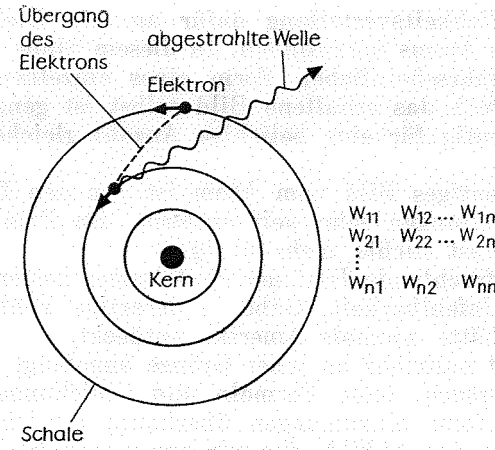

Abb. 45. Atommodell (vereinfacht) und Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten

wohin es zu springen hat: auf die k-te oder die j-te Bahn?« Damals, im Jahre 1913, konnte Bohr darauf keine Antwort geben. Erst heute, nach der Arbeit von drei Physikergenerationen, erreichte das Verständnis dieses Problems einen solchen Grad an Klarheit, daß sogar wir seine Lösung verstehen können.

Das Elektron »weiß« ganz und gar nichts im voraus — es gehorcht nur den Gesetzen der Quantenmechanik. Nach diesen Gesetzen existiert für das Elektron in einem beliebigen Quantenzustand (z.B. im Zustand, der durch die Quantenzahl n charakterisiert ist) immer eine ganz bestimmte Wahrscheinlichkeit für den Übergang in einen beliebigen anderen Zustand (z.B. den Zustand mit der Quantenzahl k). Die Größe der Wahrscheinlichkeit W_{nk}, die dem Übergang aus dem Zustand n in den Zustand k entspricht, hängt von der Wahl der beiden Quantenzustände n und k ab. Nehmen wir als Anfangs- und Endzustand alle möglichen Paare von Quantenzuständen n und k, dann bekommen wir eine quadratische Tabelle der Zahlen W_{nk}. Wir wissen bereits, daß eine derartige Tabelle eine Matrix ist und diese den inneren Zustand des Atoms darstellt (Abb. 45).

Erst jetzt können wir die Intuition von Heisenberg so recht ermessen, der, ohne die Wahrscheinlichkeitsgesetze

in der Quantenmechanik zu kennen, für deren Besonderheiten ein richtiges Gespür hatte und die quadratischen Tabellen (Matrizen) $\{X_{nk}\}$ und $\{P_{nk}\}$ einführte. Wie sich später dann herausstellte, drücken sich die Wahrscheinlichkeiten W_{nk} mittels dieser Matrizen recht einfach aus. Die Heisenbergschen Matrizen ihrerseits lassen sich leicht ausrechnen, indem man die Schrödingergleichung löst.

Die Überlegungen, denen wir eben gefolgt sind, erweisen sich ungeachtet ihrer Einfachheit als äußerst nützlich. So versteht man mit ihrer Hilfe ziemlich leicht, warum im Dublett der gelben Natriumlinie die Linie D_2 zweimal intensiver ist als die Linie D_1.

Mehr noch, wendet man die Gleichungen der Quantenmechanik folgerichtig an, so ist man imstande, auch feinere Besonderheiten der Spektrallinienstruktur herauszufinden, z.B. die Gesetze für die Änderung der Intensität innerhalb einer Linie.

Kausalität und Zufall, Wahrscheinlichkeit und genaue Voraussage

Die Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Quantenmechanik gefiel vielen Physikern nicht und rief vielfache Versuche wach, zur alten, klassischen Beschreibungsweise zurückzukehren. Das Bestreben, die alten Kenntnisse um jeden Preis auch für die neuen Bedingungen zu nutzen, ist menschlich zwar verständlich, doch durch nichts begründet. Es erinnert an die Haltung eines verknöcherten Beamten, der versucht, die ganze Mannigfaltigkeit des Lebens nur unter dem Aspekt der Dienstvorschriften zu begreifen.

Es ist noch gar nicht allzulange her, daß böswillige Interpreten der Quantenmechanik mit verdächtigem Eifer versuchten, sie nur deshalb abzulehnen, weil sie nicht in die von ihnen ausgedachten Schemata hineinpaßte. Sie entrüsteten sich über die »Willensfreiheit«, die das Elektron angeblich besitzen sollte, und witzelten über die Heisenbergsche Unschärferelation. Sie bemühten sich allen Ernstes, zu beweisen, daß die Quantenmechanik eine nutzlose Wissenschaft sei, da sie nicht reale Ereignisse behandele, sondern nur deren Wahrscheinlichkeiten untersuche. Alle, die den vorangegangenen Ausführungen aufmerksam gefolgt sind, verstehen die ganze Unsinnigkeit derartiger Beschuldigungen. Doch selbst jenen, die der Atomtheorie positiv

gegenüberstehen, fällt es schwer, die Kausalität der atomaren Erscheinungen zu bergeifen, wenn doch jede einzelne von ihnen zufälligen Charakter trägt. Unklar bleibt häufig auch, wie sicher die Voraussagen der Atomtheorie sind, wenn sie sich auf die Wahrscheinlichkeitsbegriffe gründen.

Der Kausalitätsbegriff in der Umgangssprache: »Jede Erscheinung besitzt ihre Ursache«, bedarf keiner Erläuterung, ist aber für die Physik nutzlos. Die Kausalität in der Physik zu definieren bedeutet, das Gesetz für die zeitliche Aufeinanderfolge von Erscheinungen anzugeben. In der Sprache der Mathematik nimmt ein solches Gesetz die Gestalt einer Differentialgleichung an, die man Bewegungsgleichung nennt. In der klassischen Mechanik erlauben diese Gleichungen — die Newtonschen Bewegungsgleichungen — die Voraussage der Bahnkurve eines Teilchens.

Das Schema der klassischen Mechanik zur Erklärung und Voraussage von Naturerscheinungen stellte lange Zeit das Ideal für eine kausale Beschreibung von Erscheinungen in der klassischen Physik dar. Es ließ keinen Raum für Zweifel und Uneindeutigkeiten. Um diese Eigenschaft der Kausalitätsauffassung der klassischen Mechanik zu unterstreichen, nannte man sie klassischen Determinismus.

Diese Kausalität gibt es in der Atomphysik nicht. Hier existiert eine quantenmechanische Kausalität, und sie findet in der Schrödingergleichung ihren Ausdruck. Auf ihre Weise ist sie sogar noch leistungsfähiger als die Newtonsche Gleichung, da sie aus dem Chaos zufälliger atomarer Ereignisse die Gesetzmäßigkeiten herausgliedert und klarstellt. Darin ähnelt sie einem Kaleidoskop, das in einer zufälligen Anordnung von farbigen Glasstückchen bestimmte Figuren zu sehen erlaubt.

Die Wortkombinationen »statistische Kausalität« bzw. »Wahrscheinlichkeitsgesetz« klingen äußerst ungewöhnlich, da sie zwei unvereinbare Begriffe in sich vereinen. (Eine »schmierige Schmiere« ist gewiß nichts Feines, aber doch wenigstens nicht ganz sinnlos; doch der Begriff »nichtschmierige Schmiere« ist wohl kaum zu verstehen.) In der Atomphysik sind wir gezwungen, solche Wortkombinationen zu finden, um möglichst vollständig die Besonderheiten der Quantenerscheinungen zu beschreiben. Ein logischer Widerspruch existiert hierbei nicht. Die Begriffe »Zufall« und »Gesetzmäßigkeit« sind komplementär. Entsprechend dem

Bohrschen Komplementaritätsprinzip sind sie beide gleichzeitig und gleichermaßen notwendig, um den neuen Begriff der »quantenmechanischen Kausalität« zu definieren, der mehr darstellt als nur die einfache Summe der Begriffe »Zufall« und »Gesetzmäßigkeit«. Auch das Atom ist ja etwas Komplizierteres als die einfache Summe der Wellen- und Teilcheneigenschaften.

Bei aller logischen Klarheit solcher Konstruktionen ist es dennoch schwer, sich an sie zu gewöhnen und sie als natürlich anzuerkennen. Wie so oft in der Quantenphysik lassen sich diese logischen Schwierigkeiten aus den Besonderheiten unserer Sprache und unserer Erziehung erklären. Die Begriffe »Gesetzmäßigkeit« und »Zufall«, »sichere Voraussage« und »Wahrscheinlichkeit« entstanden lange vor der Quantenmechanik, und der Sinn, den wir in sie gewöhnlich hineinlegen, hängt nicht von den Wünschen der Physiker ab. Im Prinzip ist das Problem der Wahrscheinlichkeit immer ein Problem der Beobachtung: Was ergibt sich, wenn wir dieses oder jenes tun?

In der klassischen Physik müssen zwei gleiche Versuche bei gleichen Anfangsbedingungen immer zu ein und demselben Endresultat führen. Darin liegt das Wesen der Kausalität der klassischen Physik, der klassische Determinismus. Die Besonderheit der quantenmechanischen Kausalität besteht darin, daß sie selbst bei unveränderten Versuchsbedingungen nur die Wahrscheinlichkeit für den Ausgang eines einzelnen Experiments anzugeben vermag, dafür jedoch ganz genau das allgemeine Bild voraussagt, das einer großen Anzahl derartiger Versuche entspricht.

Man kann mit den Paradoxa »gesetzmäßiger Zufall« und »voraussagbare Wahrscheinlichkeit« endlos hin und her jonglieren, ohne damit unser Wissen vom Atom auch nur um einen Deut zu bereichern. Nicht darin liegt das Wesentliche. Man muß vielmehr begreifen, daß die Wahrscheinlichkeitsbeschreibung nicht das Ergebnis einer Mittelung über vorläufig noch unbekannte Atommodelle darstellt (wie es beim Münzwurf der Fall war). Hier haben wir die Grenze der Möglichkeiten der heutigen Physik erreicht: Solange die Heisenbergsche Unschärferelation gültig ist, sind wir prinzipiell außerstande, unsere Informationen über die atomaren Systeme weiter zu präzisieren. Im Prinzip ist dies auch gar nicht nötig. Alle Körper in der Natur bestehen aus einer großen Anzahl von Atomen, und die Eigenschaften

solcher Systeme sagt die Quantenmechanik eindeutig voraus, keine Willkür zulassend.

Der Wahrscheinlichkeitsbegriff vollendete das logische Schema der Quantenmechanik. Erst mit seiner Hilfe gelang es, die komplementären Begriffe wie Welle — Teilchen, Kontinuität — Diskretheit, Kausalität — Zufall, Erscheinung — Beobachtung logisch einwandfrei miteinander zu verbinden. Erst danach konnte man herausfinden, daß all diese Begriffe ein einheitliches, unteilbares System bilden und ein jeder von ihnen in engem Zusammenhang mit dem anderen steht. Die Form der Antworten, die die Quantenmechanik auf unsere Fragen gibt, ist davon abhängig, welche Seite der atomaren Erscheinungen wir besonders gründlich untersuchen wollen.

Wenn wir die Natur studieren, trennen wir sie immer, bewußt oder unbewußt, in zwei Teile auf, in System und Beobachter. Diese Aufteilung ist nicht eindeutig und hängt davon ab, welche Erscheinung wir untersuchen und was wir über sie wissen wollen.

Verstehen wir unter der Erscheinung die Bewegung eines einzelnen atomaren Objektes, so ist dieses Ereignis diskret, zufällig und meistens nicht beobachtbar. Fassen wir jedoch die Bewegung vieler, ununterscheidbarer atomarer Objekte als Erscheinung auf, dann ist dieses Ereignis kontinuierlich, gesetzmäßig und wird durch die Wellenfunktion beschrieben.

Die Quantenmechanik untersucht nur Erscheinungen der zweiten Art. Für diese macht sie genaue und eindeutige Voraussagen, die bisher noch in keinem einzigen Falle vom Experiment widerlegt wurden.

Rund um das Quant

Forscher, Ereignisse und Quanten

Die Ergebnisse der Wissenschaft hängen nicht von den Wünschen einzelner Leute ab. In ihrer Objektivität liegt ihre Stärke und ihr Wert. Dennoch ist die Wissenschaft eine menschliche Sache, und daher stellt ihre Geschichte nicht allein die Entwicklung physikalischer Begriffe und mathematischer Methoden dar, sondern auch eine Geschichte menschlicher Schicksale. Auch aus diesem Grunde interessiert uns, wie diese Menschen gelebt und geforscht haben.

Wir versuchen zu verstehen, wie diese oder jene Kleinigkeiten, die auch den Alltag großer Wissenschaftler mitbestimmen, ihre Arbeiten, durch die sie sich unvergängliche Verdienste erwarben, beeinflußt haben.

Die Geschichte der Entstehung der Quantenmechanik hat uns einige lebendige Erinnerungen erhalten, die uns eine Vorstellung von jener angespannten schöpferischen Atmosphäre vermitteln, in der Menschen verschiedener Nationalität, unterschiedlichen Alters und Temperaments innerhalb von drei Jahren das heutige Gebäude der Quantenmechanik schufen.

Es begann vielleicht alles damit, daß Ende Mai des Jahres 1925 der wissenschaftliche Aspirant Werner Heisenberg an Heuschnupfen erkrankte und auf Anraten seines damaligen Mentors, Max Born, nach Helgoland zur Kur fuhr. Dort hatte er Zeit, ausführlich einige Berechnungen anzustellen, ohne die es unmöglich war, eine ihn schon lange quälende Idee zu realisieren. Schon am 5. Juni, gerade erst aus dem Urlaub zurückgekehrt, schrieb er an R. de L. Kronig über seine Berechnungen, und am 24. Juni legte er in einem ausführlichen Brief an Wolfgang Pauli die Grundlagen der künftigen Matrizenmechanik dar. Freilich, Heisenbergs mathematische Bildung stand damals bei weitem noch nicht auf dem Niveau seiner physikalischen Ideen. Er wußte noch nicht einmal, daß die Größen, die er hier eingeführt hatte, in der Mathematik schon längst unter der Bezeichnung Matrizen bekannt waren. Daher gelang ihm die strenge mathematische Formulierung der Theorie erst mit Hilfe von Max Born und des damals noch ganz jungen Pasqual Jordan. Schon im Juli des gleichen Jahres konnten diese drei Physiker die Ausarbeitung der Matrizenmechanik vollenden.

Unabhängig von ihnen löste in Cambridge Paul Dirac die gleiche Aufgabe. Er hatte im Sommer des Jahres 1925, während eines Seminars bei Pjotr Leonidowitsch Kapiza (geb. 1894) einen Vortrag von Werner Heisenberg gehört.

Mit Hilfe dieser neuen Mathematik fand Wolfgang Pauli im Herbst des gleichen Jahres die Energieniveaus des Wasserstoffatoms und zeigte, daß sie mit den Energieniveaus des Bohrschen Atommodells zusammenfallen. Kurz vorher hatten George Eugene Uhlenbeck und Samuel Abraham Goudsmit die Hypothese vom Elektronenspin vorgeschlagen, Louis de Broglie der Idee über die Materiewelle ihre end-

gültige Form gegeben und Walter Elsasser und Albert Einstein empfohlen, mit Hilfe dieser Theorien die Experimente von Clinton Joseph Davisson über die Reflexion von Elektronenstrahlen an den Metalloberflächen zu erklären.

Die Wellenmechanik wurde ein Jahr später geboren, im Frühjahr des Jahres 1926. Man begegnete ihr mißtrauisch, da in ihr ganz offenbar die Quantensprünge fehlten, d.h. jene Dinge, an die man sich gerade erst unter großen Anstrengungen gewöhnt hatte und die man als die hauptsächlichste Besonderheit der atomaren Erscheinungen ansah.

Im Juni des Jahres 1926 fuhr Heisenberg nach München. Hier geriet er nach seinen eigenen Worten in völlige Verzweiflung, als er Erwin Schrödingers Interpretation der Quantenmechanik hörte. Experimentalphysiker wie Wilhelm Wien u.a. griffen allerdings Schrödingers Theorie begeistert auf, während sie Heisenbergs Arbeiten als »Atomystik« ablehnten. Die Streitgespräche über die Wellenmechanik dauerten Stunden und Tage und erreichten ihren Höhepunkt im September 1926, als Schrödinger auf Einladung von Niels Bohr nach Kopenhagen fuhr.

Im Laufe der Zeit näherten sich jedoch die Standpunkte der Anhänger der Matrizen- und Wellenmechanik einander an. Schrödinger selbst konnte die mathematische Äquivalenz beider Mechaniken nachweisen, und Born hatte im Sommer des Jahres 1926, den entscheidenden Einfall, welchen physikalischen Sinn man der Schrödingerschen ψ-Funktion zuschreiben muß.

Die Experimente zur Elektronenbewegung, die im Herbst des Jahres 1926 bekannt wurden, festigten das Zutrauen zur Theorie von de Broglie und Schrödinger. Allmählich begriffen die Physiker, daß der Welle-Teilchen-Dualismus eine experimentell gesicherte Tatsache ist, die man ohne Diskussionen zur Kenntnis nehmen und zum Ausgangspunkt aller theoretischen Überlegungen machen muß.

Jetzt bemühten sich die Physiker, darüber Klarheit zu gewinnen, zu welchen Folgerungen der Welle-Teilchen-Dualismus führt und welche Einschränkungen er den Vorstellungen über die atomaren Prozesse auferlegt. Dabei stießen sie auf eine Vielzahl von Paradoxa, deren Sinn häufig nicht verstanden wurde.

In jenem Herbst des Jahres 1926 wohnte Heisenberg in einer Mansarde des physikalischen Instituts in Kopenhagen. An den Abenden kam Niels Bohr meist zu ihm herauf,

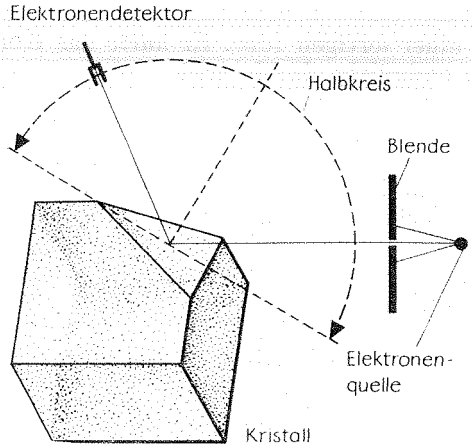

Abb. 46. Versuch Davisson und Germer

und es begannen dann Diskussionen, die sich oft bis tief in die Nacht hinzogen. Wie Heisenberg sich später erinnerte, führten diese Streitgespräche angesichts der Unverständlichkeit der Quantentheorie zuweilen zu tiefer Ratlosigkeit. Heisenberg berichtet, daß er eines Tages nach einer langen ergebnislosen Diskussion während eines nächtlichen Spazierganges auf den Gedanken kam, ob man nicht postulieren müßte, daß die Natur nur die Existenz solcher Experimente erlaubt, in denen man niemals gleichzeitig die Lage und die Geschwindigkeit eines atomaren Objektes bestimmen kann.

Dieser Gedanke enthält den Keim der künftigen Unschärferelation.

Um sich von den Anstrengungen dieser Tage zu erholen, fuhr Niels Bohr Ende Februar 1927 nach Norwegen zum Wintersport. Allein geblieben, setzte Heisenberg seine Überlegungen fort. Insbesondere beschäftigte ihn eine Frage, die ein Studienkollege vor geraumer Zeit aufgeworfen hatte: Warum läßt sich die Bahn des Elektrons im Atom mit Hilfe von Strahlen sehr kleiner Wellenlänge, z.B. mit Gammastrahlen, nicht beobachten?

Die Erörterung dieses Problems führte Heisenberg ziemlich schnell zur Unschärferelation, und bereits am 23. Februar schrieb er Pauli darüber einen 14seitigen Brief.

Wenige Tage später kehrte Bohr aus dem Urlaub zurück — auch mit einer fertigen Idee. Er hatte das Komplementaritätsprinzip endgültig durchdacht.

Nach einigen weiteren Wochen angestrengter Arbeit kam man zu dem Schluß, daß die Unschärferelation einen Sonderfall des Komplementaritätsprinzips darstellt, der sich quantitativ formulieren läßt. In den Folgemonaten wurde der mathematische Formalismus der Quantenmechanik ergänzt und präzisiert und auf dem Solvay-Kongreß in Brüssel im Herbst des Jahres 1927 endgültig akzeptiert. An diesem Kongreß nahmen Planck, Einstein, Lorentz, Bohr, de Broglie, Born, Schrödinger von der älteren Generation sowie Heisenberg, Pauli, Dirac und Kramers von der jüngeren teil. Hier erfolgte die härteste Prüfung aller Aussagen der Quantenmechanik. Sie bestand dieses Examen mit Erfolg.

In jenen Jahren wurde in Bohrs Institut in Kopenhagen nicht nur die Wissenschaft von den Atomen geschaffen, sondern hier wuchs auch eine internationale Familie junger Physiker heran. Unter ihnen waren Heisenberg, Ehrenfest, Pauli, Kramers, Gamow, Landau, Goudsmit und viele andere. Die damals beispiellose Zusammenarbeit von Wissenschaftlern verschiedener Länder war durch kompromißloses Streben nach Wahrheit gekennzeichnet, durch echte Begeisterung angesichts der Größe jener Aufgaben, die zu lösen waren, und durch den unverwüstlichen Sinn für Humor. »Es gibt Dinge, die so ernst sind, daß man nur im Spaß über sie sprechen kann«, pflegte Niels Bohr oft zu sagen.

Viele Jahre später zerstreuten die politischen Ereignisse diese Physiker in alle Welt. Heute leben nur noch wenige von ihnen. Mit ihnen ist eine ganze Epoche der Physik endgültig in den Bereich der Geschichte eingegangen.

Wenn Niels Bohr sein Komplementaritätsprinzip anhand von Beispielen erläuterte, verwies er gern auf den bekannten Aphorismus von Bernhard Shaw: »Ein guter Spezialist ist, wer viel über weniges, ein guter Journalist, wer wenig von allem weiß. Im Grenzfall heißt dies: Der beste Spezialist weiß alles über nichts, der beste Journalist nichts von allem.«

Diese scherzhafte Übertreibung hat in unserer Zeit eine besondere Bedeutung gewonnen — angesichts der Tatsache, daß der Mensch in der täglich über ihn hereinbrechenden Informationsflut zu ertrinken droht: Bücher, Rundfunk, Fernsehen, Zeitschriften.... (In den Bibliotheken der Welt werden etwa 60 Millionen Bücher aufbewahrt, und jede Minute erscheint ein neues Buch.) Wer unvorbereitet in diesen Strom des Wissens gerät, verzweifelt rasch bei dem Versuch, auch nur etwas verstehen zu wollen, läßt sich von der Strömung treiben und weiß überhaupt nichts von allem. Kurzsichtige Leute versuchen sich selbst und andere zu betrügen, indem sie aus diesem Strom nur einige Leckerbissen des Wissens herausfischen, die heute bequem genug angeboten werden und zu alledem eine ansprechende Verpackung aufweisen.

Ein großer Teil der Menschen versucht indessen, trotzdem aus dem Informationsstrom nur jene Kenntnisse zu entnehmen, die absolut notwendig für sie sind oder ihnen irgendwie Freude bereiten. Natürlich tut dies jeder auf seine Art und nach Maßgabe seiner Kräfte, die ihm von der Natur zugeteilt sind. Der Prozeß verläuft streng individuell, ist in vielem spontan und erscheint einer einwandfreien logischen Analyse unzugänglich. Leider sind wir außerstande, jedem Neugeborenen ein Rezept in die Wiege zu legen, auf dem genau verzeichnet steht, wann und in welcher Reihenfolge welche Bücher der Mensch im Laufe seines Leben unbedingt lesen muß.

Einige Regeln freilich existieren trotz allem, wie man auch Mittel und Wege zur Verlängerung des Lebens kennt,

obwohl es ein Unsterblichkeitsrezept weder gab noch geben wird. Es ist unmöglich, alles zu wissen, aber gut, vieles zu wissen. Das mindeste aber besteht darin, irgend etwas gründlich zu kennen. Nur Wissen von dieser Art verleiht dem Menschen die Fähigkeit, selbständig zu denken und neue Werte zu schaffen.

Für den Erkenntnisprozeß ist die »Unschärferelation« noch nicht gefunden, die das Gleichgewicht zwischen »Quantität« und »Qualität« der unbedingt erforderlichen Kenntnisse angibt und bei Auswahl des Gegenstandes und des zu seinem Studium angewendeten Verfahrens die Grenzen des Möglichen streng definiert. Eines ist allerdings unbestritten: Oberflächlichkeit bringt weder Nutzen noch Vergnügen. Auf die eine oder andere Art sind wir alle von der logischen Klarheit und dem Leistungsvermögen der Wissenschaft tief beeindruckt; doch »Salonkonversation« über die Wissenschaft trägt stets den Stempel ganz besonderer Inhaltslosigkeit, wenn die Kenntnis exakter Tatsachen und klarer Begriffe fehlt.

Im Verlauf unseres Berichtes über die Quantenmechanik haben wir uns bemüht, nur exakte Tatsachen und nur exakte Begriffe zu verwenden. Selbstverständlich werden Sie, selbst wenn Sie sich diese Tatsachen und Begriffe ganz zu eigen gemacht haben, noch nicht imstande sein, einen Laser zu konstruieren oder einen Kernreaktor zu berechnen. Aber Sie besuchen ja auch einen Vortrag über die Musik nicht mit dem Ziel, das Violinspiel zu erlernen.

So sind wir an das Ende unseres Berichtes gekommen. Sind wir jetzt imstande, eine sinnvolle Antwort auf die Grundfragen zu geben, die wir ganz zu Anfang stellten: Was ist Quantenmechanik? — Was ist ein Atom?

Nun, eine Antwort auf diese Frage existiert, wenn sie auch etwas eigenartig aussieht.

Unseren Bericht über die Quantenmechanik hatten wir mit der Definition begonnen: »Die Quantenmechanik ist die Wissenschaft von der Struktur und den Eigenschaften atomarer Objekte und Erscheinungen.« Allerdings mußten wir diese Definition sogleich zur Seite legen, weil ihre Nutzlosigkeit ohne die Definition des Begriffes »atomares Objekt« offensichtlich war. So wandten wir uns der Analyse jener Versuche zu, in denen sich die Eigenschaften des Atoms abzeichnen, sowie der Analyse jener Formeln, die die Vorhersage der Ergebnisse dieser Versuche gestatten.

Dabei kam eine erstaunliche Sache ans Tageslicht: Alle Formeln, die die Eigenschaften atomarer Objekte beschreiben, enthalten unvermeidlich die Plancksche Konstante h. Wenn ein Physiker heute eine Gleichung zu Gesicht bekommt, die das Wirkungsquantum h enthält, so schließt er daraus unfehlbar, daß er eine Gleichung der Quantenmechanik vor sich hat.

Auf dieser Grundlage könnte man die Quantenmechanik als das System aller Gleichungen definieren, die notwendigerweise das Plancksche Wirkungsquantum h enthalten. Diese Definition vermag allerdings nur unser Streben nach Eindeutigkeit und formaler Strenge zu befriedigen. Sie enthält keine Aussage zur Sache selbst. Eine wissenschaftliche Definition muß auf den Forschungsgegenstand hinweisen und nicht nur auf die Methode, mit der dieses Ziel erreicht wird.

Angesichts der großen Zahl unserer Versuche, auf die Frage nach dem Wesen des Atoms zu antworten, könnten wir jetzt einfach sagen: »Das Atom ist alles das, was wir jetzt darüber wissen.« Allerdings wäre auch das wiederum keine Definition, sondern nur ein wohlklingender Vorwand, die Definition zu umgehen. Wie könnte man den Begriff »Atom« kurz und unmißverständlich definieren?

Nachdem wir uns wiederholt davon überzeugen mußten, daß die ganze Viefalt und Kompliziertheit dieses Begriffes in keinem einzigen Wort unserer Sprache Platz findet, wandten wir uns den Gleichungen der Quantenmechanik zu und entwickelten mit Hilfe von Formeln ein Abbild des Atoms. Dabei folgten wir bewußt der Methode der modernen Physik.

Worin liegt das Wesen dieser Methode? In erster Linie verbietet sie, von Erscheinungen an und für sich, d.h. unabhängig vom Verfahren ihrer Beobachtung zu sprechen. Die Begriffe »Erscheinung« und »Beobachtung« existieren nur in unserem Bewußtsein unabhängig voneinander, und auch hier nur mit begrenzter Genauigkeit. Für den Physiker dagegen sind diese beiden Begriffe zwei Seiten ein und derselben physikalischen Realität, die er erforscht und von deren objektiver Existenz er fest überzeugt ist.

Die Begriffe »Erscheinung« und »Beobachtung« sind komplementär im Bohrschen Sinne. Beide sind aber unvereinbar: Die Beobachtung zerstört die Erscheinung in ihrer Ursprünglichkeit. Jedoch beide sind gleichermaßen not-

wendig: Ohne die Beobachtung erfahren wir überhaupt nichts von der Erscheinung. Ihre komplizierte Einheit und Wechselwirkung erlauben uns keinen Zugang zum Wesen der Erscheinung an und für sich, sondern ermöglichen uns nur, die Beziehungen zwischen den Erscheinungen aufzudecken.

Wir können diese Beziehungen mit Hilfe von Formeln niederschreiben und dann auch mit Worten darüber berichten. Diese Worte hängen jedoch »in der Luft«, wenn man nicht die entsprechenden Formeln daneben schreibt. Auch die Formeln sind ohne Leben, solange wir kein Verfahren gefunden haben, mit dem wir erklären können, was sie wirklich bedeuten. Zur vollständigen Erklärung des Komplexes »Erscheinung — Beobachtung« bedarf es einer harmonischen Kombination von Begriffen und Formeln. Erst danach vermag man ein befriedigendes Abbild, eine anschauliche Vorstellung der physikalischen Erscheinung zu entwerfen. Auf dieser Etappe verändert die Erkenntniskette der neuen Physik

Erscheinung ← Abbild ← Begriff ← Formel ← Versuch

nochmals ihr Aussehen. Sie wird komplizierter und nimmt die nachstehende Form an:

$$\left\{\begin{array}{c}\text{Erscheinung}\\ \downarrow\ \uparrow\\ \text{Beobachtung}\end{array}\right\} \rightarrow \left\{\begin{array}{c}\text{Begriff}\\ \downarrow\ \uparrow\\ \text{Formel}\end{array}\right\} \rightarrow \text{Abbild.}$$

Bei unseren fortgesetzten Versuchen, den Begriff »Atom« zu definieren, sind wir unbewußt auf dieses Schema zugesteuert.

Die Ausbildung der Physiker von heute beginnt mit den Formeln. Wahrscheinlich ist das auch vernünftig: Beim Erlernen einer Fremdsprache ist es auch besser, gleich sprechen zu lernen und nicht erst jedesmal zu erklären, warum ein bestimmtes Wort so und nicht anders geschrieben wird.

Im Anschluß an die Formeln eignen sich die Physiker jene Worte an, die man dabei gebrauchen muß und ohne die überhaupt keine Verständigung der Menschen untereinander möglich ist. Doch die Formeln haben keine exakten verbalen Äquivalente. Deshalb besteht die Ausbildung in moderner Physik darin, ungewöhnliche Dinge mit gewohnten Worten darzulegen, doch jedesmal unter einem etwas

anderen, neuen Aspekt. Damit erreicht man das Eindringen der neuen Begriffe aus der logischen und bewußten Sphäre in die intuitive und unbewußte Sphäre — eine für jegliches Schöpfertum unabdingbare Voraussetzung.

Dieses Verfahren, nach dem die Physiker ausgebildet werden, führt ganz unmerklich zu einer Deformierung des Systems ihrer Abbilder und Begriffe, ja sogar des Systems ihrer Assoziationen. Wie jeden Menschen, der seine Sprache gut beherrscht, überläuft es auch die Physiker immer wieder kalt, wenn sie die makellos richtigen verbalen Konstruktionen der meisten populärwissenschaftlichen Bücher lesen: Sie hören hier unfehlbar einen kaum wahrnehmbaren fremden Akzent heraus. Der Sinn eines fremdsprachigen Satzes läßt sich nicht übermitteln, ohne dabei seine ursprüngliche Struktur zu zerstören. Die Sprache, in der sich die Physiker untereinander verständigen, ist oftmals nur nach ihrer Bezeichnung und nach einzelnen Worten als russische, englische oder sonst irgendeine Sprache zu bezeichnen. In Wahrheit handelt es sich hier um eine besondere Sprache, deren Lexik und grammatikalische Konstruktionen jeden Stilredakteur zur Raserei bringen würde. Doch bei jedem Versuch, eine »struppige« physikalische Redewendung nach den Normen der Literatursprache »zurechtzustriegeln«, verliert dieser Satz etwas, genau wie Verse selbst bei guter Übersetzung etwas von ihrer ursprünglichen Schönheit einbüßen.

Die »ungestriegelte« physikalische Wahrheit besteht in folgendem:

Das atomare Objekt ist eine physikalische Realität, deren Eigenschaften man mit Hilfe der Gleichungen der Quantenmechanik beschreiben kann.

Die Quantenmechanik ist ein System von Formeln, Begriffen und Abbildern, das die Darstellung, Erklärung und Vorhersage der beobachtbaren Eigenschaften atomarer Objekte erlaubt.

Diese beiden Definitionen erwecken — wenn man sie einander gegenüberstellt — den Eindruck, als habe sich hier jemand über den gesunden Menschenverstand lustig machen wollen. Doch im Rahmen des Komplementaritätsprinzips sind sie völlig natürlich. Das hat seinen Grund darin, daß die Begriffe »atomares Objekt« und »Quantenmechanik« komplementär im Sinne Bohrs sind. Das gilt hier genauso wie für die Begriffe Koordinate und Impuls, Welle

und Teilchen, Erscheinung und Beobachtung, Wahrscheinlichkeit und Sicherheit oder Kausalität und Zufall. Sie können sich nicht gegenseitig ersetzen, und keiner von ihnen kann ohne Berücksichtigung des entsprechenden komplementären Begriffs vollständig definiert werden. Daran muß man sich gewöhnen, damit muß man leben — das ist nun einmal das Schicksal aller wirklich grundlegenden Begriffe.

Niels Bohr wurde bis an das Ende seines Lebens nicht müde, dies immer aufs neue in Erinnerung zu bringen. Er schlug sogar ein Verfahren zur Unterscheidung sinnvoller von trivialen Behauptungen vor: Man braucht dazu jeweils nur die gegenteilige Behauptung zu formulieren, und wenn sich dabei zeigt, daß diese absurd ist, dann ist die ursprüngliche Behauptung trivial. Er gab auch Beispiele dafür an. Die Behauptung »Alle Menschen sind sterblich« ist trivial, da die gegenteilige Behauptung »Alle Menschen sind nicht sterblich« absurd ist.

Die Fähigkeit, entsprechend dem Bohrschen Komplementaritätsprinzip zu denken, muß man ebenso entwickeln wie jede andere Fähigkeit, die uns die Natur nur als Anlage mitgegeben hat. Es genügt nicht, sich nur die formalen Regeln für die Konstruktion von Begriffen anzueignen. Man muß sich darüber hinaus auch vorstellen, woraus sie entstanden sind. Das ist auch der Grund dafür, daß wir uns so lange und gründlich mit den Experimenten befaßt haben, aus denen sich der Begriff »atomares Objekt« herauskristallisierte. Für sich allein genommen — losgerissen von diesen Versuchen — bedeutet der Begriff nichts. Er fixiert lediglich in der Sprache der formalen Logik jene intuitiv gewonnene Vorstellung, die sie allmählich — und oftmals ohne unser Zutun — in unserem Bewußtsein geformt hat.

Unsere jetzige Definition der Quantenmechanik stimmt mit jener überein, die wir ganz zu Beginn des Buches angegeben haben. Und wenn sie dennoch anders zu klingen scheint, so bedeutet es, daß Sie dieses Buch nicht vergebens gelesen haben.

Hier könnte man den Bericht über die Quantenmechanik abschließen, wenn da nicht ein bedeutsamer Umstand wäre. Als wir sagten, daß das Atom eine physikalische Realität ist, berührten wir ungewollt das umfangreiche Grenzgebiet zwischen der Physik und der Philosophie.

Der Begriff »physikalische Realität« ist der letzte in der Reihe der Begriffe, auf die man bei jedem ernst ge-

meinten Versuch, irgend etwas in der Physik zu erklären, unvermeidlich stößt. Seiner Universalität wegen ist er so weitreichend und allumfassend, daß sich seine Definition mit den Mitteln der Physik allein als unmöglich erweist. Hier muß unvermeidlich die Philosophie mit ihrem Begriff der objektiven Realität herangezogen werden.

Bekanntlich ist die objektive Realität alles das, was es außerhalb und unabhängig von unserem Bewußtsein gibt und gab. (Übrigens ist auch unser Bewußtsein und sind unsere Empfindungen ebenfalls objektive Realität.)

Vom objektiven Wesen der erkennbaren Welt sind heute wohl alle Wissenschaftler überzeugt, da sie sonst kaum ihr ganzes Leben der Erforschung dieser Realität widmen würden. Die Meinungen gehen nur hinsichtlich der Natur der physikalischen Realität, ihres Wahrheitsgehaltes und ihrer Eindeutigkeit auseinander. Ein großer Teil der Physiker ist der Auffassung, daß die physikalische Realität jener Teil der objektiven Realität ist, den wir mit Hilfe des Versuchs und unseres Bewußtseins erkennen, d.h. alle jene Tatsachen und Zahlen, die wir mit Hilfe unserer Meßgeräte erhalten, sowie auch alles das, was wir darüber denken.

Meinungen sind eine sehr unsichere Sache. Warum eigentlich sind wir davon überzeugt, daß das auf diesem Wege gewonnene Bild der physikalischen Realität wahr ist? Oder — etwas zurückhaltender formuliert (da ja niemand weiß, was »die« Wahrheit ist) — warum sind wir davon überzeugt, daß dieses Bild das einzig mögliche ist?

Die physikalische Realität

Die Präzisierung von Begriffen ist ein kompliziertes und nicht immer ungefährliches Unterfangen. Sokrates mußte seine hartnäckigen Versuche, den Sinn der moralisch-ethischen Grundbegriffe wie gut und böse, Wahrheit und Irrtum, Gerechtigkeit und Gesetz zu erklären, seinerzeit mit dem Leben bezahlen ... Sokrates lebte in der Blütezeit des antiken Griechenlands. Als weiser Mann verbrachte er seine Tage auf den sonnigen Plätzen Athens, und er stellte seinen Mitbürgern Fragen wie etwa die folgende:

»Sage mir, hochgelehrter Gippius, was ist das Schöne?« Der gelehrte Gesprächspartner machte sich mit Enthusiasmus an die Erklärung, mußte sich jedoch schon bald davon

überzeugen, daß er über die Erläuterung von Beispielen nicht hinausgelangen konnte: Zwar vermochte er mehr oder weniger klar auszudrücken, was eine schöne Frau oder ein schönes Pferd ist usw., doch stets war er außerstande, zu erklären, worin das Schöne an und für sich besteht.

Die Tragik dieser für einen Denker typischen Situation verstand man zu allen Zeiten gut. Sie wurde erkannt und akzeptiert.

»Die Wahrheit liegt, außerhalb der Grenzen unseres Erkenntnisvermögens und kann daher nicht mit Worten ausgedrückt werden«, sagte man im alten Indien. »Worüber man mit Worten nichts zu sagen vermag, muß man schweigen«, schrieben »moderne« Philosophen.

In unserem Bemühen, die Frage »Was ist ein Atom?« zu beantworten, stoßen wir unvermeidlich auf die gleichen Schwierigkeiten. Ebenso wie den Philosophen des Altertums ist es uns nicht immer möglich, sie mit Hilfe von Worten zu überwinden. Trotzdem haben wir es leichter: Die Wissenschaft brachte die Formeln auf, mit denen wir viele Schwierigkeiten umgehen können.

Ausgehend von einzelnen Beispielen haben wir uns allmählich davon überzeugt, daß das Atom nicht die Gesamtheit der Spektrallinien ist, die es aussendet, nicht die Vielfalt der Kristalle, die aus Atomen aufgebaut sind, nicht die Wärme des glühenden Eisens und auch nicht die Elektronen, die die Atome emittieren. Und ähnlich den Gesprächspartnern des Sokrates müssen wir gezwungenermaßen zugeben, daß das Atom etwas an und für sich nicht Definierbares ist, sondern jene gewisse allgemeine Ursache der atomaren Erscheinungen darstellt, die sich unabhängig von diesen nicht erkennen läßt.

Gehen Sie nur einmal in irgendein physikalisches Labor und versuchen Sie, von der Türschwelle aus festzustellen, welche Naturerscheinung darin erforscht wird. Was Sie zu sehen bekommen, sind übereinandergetürmte Geräte und ein wirres Durcheinander von Leitungen, hinter denen man nicht einmal die Physiker erkennen kann, ganz zu schweigen von der Erscheinung, die sie zu erforschen berufen sind. Unter diesen Umständen vermögen Worte wie: »Wir untersuchen hier die Aufspaltung der Spektrallinien im Magnetfeld« allenfalls höfliche Aufmerksamkeit, gewiß aber nicht das geringste Vertrauen auszulösen.

Selbst wenn man Ihnen eine fotografische Platte in die

Hand gibt, auf der Sie schmale, schwarze Linien sehen können, entsteht doch keinerlei Assoziation zu den Atomen, aus deren Innerem (wie die Physiker dann eifrig erklären werden) angeblich diese Strahlung emittiert wurde, die nach Umwandlung im Spektroskop ihre scharf ausgeprägten Spuren auf der fotografischen Platte zurückließ.

Wer mit der Physik nichts zu tun hat, dem müssen alle diese Erklärungen sehr wenig überzeugend vorkommen. Ihm leuchtet zwar mehr oder weniger ein, wie der Mechaniker aus dem Geräusch eines Motors auf einen eventuellen Fehler schließt oder wie der Arzt aus den Beschwerden seines Patienten zur richtigen Diagnose gelangt. Er weiß ja: Man kann den Motor im Zweifelsfall stets auseinandernehmen — seine Einzelteile werden sich dabei nicht verändern —, und um sich von der Richtigkeit der Diagnose zu überzeugen, kann man — schlimmstenfalls — eine Autopsie durchführen. In beiden Fällen sind alle Einzelteile bekannt, aus denen das Ganze besteht. Selbst wenn Sie kein Uhrmacher sind, können Sie beim Auseinandernehmen einer Uhr begreifen, wie sie funktioniert und warum die sichtbare Bewegung der Uhrzeiger der gewöhnlich unsichtbaren Bewegung der Federn und Rädchen im Inneren der Uhr unähnlich ist.

Bei den Atomen ist das alles viel komplizierter. Wir beobachten das äußere Erscheinungsbild ihrer Eigenschaften: die Spektren, die Farben der Körper sowie deren Wärmekapazität und kristalline Struktur. Aber wir können danach nicht den »Uhrdeckel« aufklappen und nachsehen, wie das Atom »wirklich« konstruiert ist. Aus der Gesamtheit von Tatsachen, Begriffen und Formeln haben wir uns ein gewisses Bild vom Atom geschaffen. Da jedoch keinerlei unabhängiges Verfahren zur Überprüfung dieses Bildes existiert, entsteht die ganz natürliche Frage: Könnte man nicht vielleicht ein anderes Bild des Atoms ausdenken, das trotzdem zu den gleichen beobachtbaren Folgerungen führt?

Die Frage ist nicht müßig, vielmehr haben sich fast alle großen Physiker damit beschäftigt. Der skeptische »Mann von der Straße« formuliert das Problem allerdings etwas anders: »Alles, was ihr euch da ausgedacht habt, ist falsch. In Wirklichkeit sieht es doch anders aus!«

Dieser Einwand ist schwer zu widerlegen, weil der Begriff »in Wirklichkeit« nicht wirklich definiert ist. Im allgemein üblichen Sinn existiert »in Wirklichkeit« nur

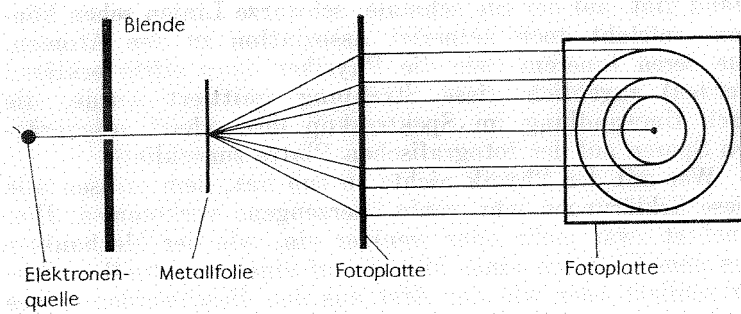

Abb. 47. Elektronenbeugung an Metallfolie als Beweis für die Welleneigenschaften des Elektrons

das, was wir mit Hilfe unserer fünf Sinne nachprüfen oder wovon wir uns mittels unserer verlängerten Sinnesorgane, nämlich der Geräte, überzeugen können.

Aber selbst mit dem letzten Teil dieser Behauptung war man keineswegs von Anfang an einverstanden: Zum Beispiel warfen die Zeitgenossen Galileis ihm vor, daß die von ihm entdeckten Sonnenflecken ebenso wie die Jupitermonde in Wirklichkeit keine Entdeckungen, sondern optische Täuschungen darstellten, verursacht durch das Fernrohr, das er benutzte.

Auch wenn wir davon ausgehen, daß sich die Zeiten seit Galilei geändert haben und wir heute von der Richtigkeit der Angaben der Meßgeräte überzeugt sind, so steht uns doch noch immer die Interpretation dieser Angaben frei. Das Problem »in Wirklichkeit« bedeutet jetzt: »Wie eindeutig ist die Interpretation der Versuche bezüglich jener Erscheinungen, die der unmittelbaren sinnlichen Wahrnehmung unzugänglich sind?«

Ein Mensch, der mit der Wissenschaft nichts zu tun hat, muß — gestützt auf seinen »gesunden Menschenverstand« — zu der Auffassung gelangen, daß jede dieser Interpretationen nicht eindeutig ist. Nach einem flüchtigen Besuch in einem Physikerlabor muß sich diese auf den ersten Eindruck hin gefaßte Meinung verstärken.

Allein die Physiker wissen, daß die Tatsachen und Begriffe ihrer Wissenschaft eine Freiheit der Interpretation nur im Prozeß der Entdeckung und Formierung gewähren. Sobald sie einmal in das Gesamtsystem der physikalischen

Kenntnisse aufgenommen und mit diesen abgestimmt sind, ist es fast unmöglich, sie zu verändern, es sei denn, man überschreitet die Grenzen ihrer Anwendbarkeit.

Mit der Vertiefung und Präzisierung des Systems wissenschaftlicher Kenntnisse müssen wir uns zwangsläufig immer weiter von den unmittelbaren sinnlichen Wahrnehmungen und jenen Begriffen entfernen, die auf deren Grundlage entstanden sind. Dieser Abstraktionsprozeß ist nicht umkehrbar. Aber das ist kein Grund für uns, »Trübsal zu blasen«, da unser Verstand doch befähigt ist, selbst das zu begreifen, was wir uns nicht vorstellen können. Die Abstraktheit wissenschaftlicher Begriffe ist eine ebensolche Notwendigkeit wie die Erfindung der Buchstabenschrift, die die alten Runen und Hieroglyphen ablöste. In dem Wort »Nashorn« erinnert kein einziger Buchstabe an das Tier, und trotzdem löst das Wort insgesamt unfehlbar das entsprechende Abbild in unserem Gedächtnis aus. Jedermann sieht ein, daß unsere heutige Kultur ohne die Buchdruckerkunst undenkbar wäre. Doch bei weitem nicht jeder ist sich darüber im klaren, daß die Weiterentwicklung der Wissenschaft ohne weitere Abstraktion der wissenschaftlichen Begriffe unmöglich wäre. Der »gesunde Menschenverstand« muß diese Tatsache als gegeben hinnehmen. Die abstrakte Wissenschaft braucht ebenso wie die Musik keine Rechtfertigung, sondern erfordert tiefes Verständnis: Nur so kann man die ungewohnte atomare Realität erkennen, obwohl sie eine Realität gänzlich anderer Art ist als z.B. wägbare und sichtbare Steine oder Bäume es sind.

Doch selbst diese »abstrakte Realität« versucht sich der Mensch stets anschaulich vorzustellen, d.h., sie auf eine kleine Anzahl bekannter Abbilder zu reduzieren. Dieses Streben ist sehr tief im Menschen verwurzelt, und darum entwickelte sich bei den Physikern allmählich ein eigenes, merkwürdiges System von Abbildern, das fast mit Sicherheit kein reales Äquivalent in der Natur besitzt und sich mit Worten nicht beschreiben läßt, den Physikern aber dennoch hilft, die Beziehungen zwischen den Erscheinungen aufzufinden.

Jene Ketten der Erkenntnis, die wir im vorigen Abschnitt dargestellt haben und die von den Erscheinungen über die Begriffe und Formeln zu den Abbildern führten, sind nicht mehr als Schemata, die nur eine recht schwache Vorstellung von den komplizierten Prozessen geben, die

im Bewußtsein eines Wissenschaftlers vor sich gehen, wenn er versucht, in einem ungeordneten Haufen von Fakten einfache Zusammenhänge aufzusuchen, sie mit Worten zu definieren und den ihnen zustehenden Platz im Gesamtbild der Natur zu finden.

Das einzelne Wort macht noch keine Sprache aus. Dazu bedarf es vielmehr eines ganzen Komplexes von Wörtern sowie der grammatikalischen Regeln, nach denen sie kombiniert werden. Ebenso bedeutet die einzelne wissenschaftliche Tatsache, wie wichtig sie auch immer erscheinen möge, an und für sich gar nichts, wenn ihr Platz im Gesamtsystem des Wissens unbekannt ist. Erst im Verein mit ihrer Interpretation erhält sie Sinn und Bedeutung.

Erinnern Sich sich an die D-Linie des Natriums und ihre Geschichte? Beobachtet wurde sie bereits von Fraunhofer. Aber konnte er vermuten, daß er den Schlüssel zur gesamten Quantenmechanik in seinen Händen hielt? Gewiß, er sah, daß sich diese Linie in zwei Komponenten aufspaltete. Aber wußte er denn, daß dieser Effekt vom Spin des Elektrons herrührt? Die Begriffe Elektron, Quantenmechanik und Spin waren zu Fraunhofers Zeiten noch nicht gefunden. Ohne sie ist die D-Linie des Natriums nicht mehr als eine interessante Tatsache, die zu keinerlei weitreichenden Folgerungen führt. Erst nach den Versuchen von Crookes, Rutherford und Thomson sowie nach der Schaffung jenes Systems von Begriffen und Formeln, das man dann als Quantenmechanik bezeichnete, wurde klar, daß die D-Linie des Natriums eine jener Tatsachen darstellt, die entscheidend die Grundlagen unseres physikalischen Denkens verändern.

Die Harmonie aller Erscheinungen der atomaren Welt vermögen wir nur dank der Theorie einzuschätzen: Jede Beschreibung der experimentellen Anlage allein ist langweilig und uninteressant. Erst die Theorie befähigt zum intuitiven Eindringen in das Wesen der beobachteten Erscheinungen. Sie erlaubt es, jene Eigenschaften der Erscheinungen zu »erraten«, die jenseits unserer Erfahrung liegen, und die offenkundige Kompliziertheit auf einfache Weise zu erklären. Diese Art zu denken führte über Forscher wie Dalton oder Bohr zur modernen Atomistik. Erst die Theorie machte das Bild vom Atom nicht nur logisch zufriedenstellend, sondern auch ästhetisch akzeptabel.

Daß Begriffe auf der Grundlage neuer Tatsachen entstehen, erscheint jedermann offenkundig. Doch nicht alle ge-

ben sich Rechenschaft darüber, in welchem Maße der Sinn bzw. die Bedeutung neuer Tatsachen von den Begriffen abhängt, die man zu ihrer Interpretation benutzt. Mit der Fortentwicklung und Vertiefung der wissenschaftlichen Kenntnisse nimmt die wechselseitige Beeinflussung zwischen den Tatsachen und den Begriffen allmählich zu, und die Erkenntniskette wandelt sich ein weiteres Mal:

In unserer Zeit ist diese Wechselwirkung so stark geworden, daß es zuweilen schwerfällt, Tatsachen von ihrer Interpretation zu trennen. Das Ergebnis aus dieser Wechselwirkung wird häufig als Informationsexplosion bezeichnet — so rasch führt die unkontrollierte wechselseitige Beeinflussung zwischen neuen Tatsachen und Begriffen zu realen praktischen Folgen.

Die komplizierte Verflechtung von Tatsachen, Begriffen, Formeln und Abbildern läßt sich nur sehr schwer entwirren, und vielleicht ist dies sogar unmöglich. Bei allen Versuchen dieser Art stoßen wir im Endeffekt unvermeidlich auf die Frage: »Was war früher da, das Ei oder die Henne?«

Immanuel Kant (1724—1804) versuchte, diesen Teufelskreis zu durchbrechen. Die Begriffe hängen von den Versuchsergebnissen ab und die Interpretation der Experimente vom Begriffssystem. Er nahm an, daß einige dieser Begriffe dem Menschen »von Gott« gegeben seien. Sie würden mit dem Menschen geboren, und alle übrigen Wahrheiten könne er durch Kombination der ursprünglichen Begriffe finden, wenn er dabei keine logischen Fehler mache. Auf der Grundlage dieser Annahme entwickelte er eine in sich geschlossene Erkenntnisphilosophie. Die Entwicklung der Physik zeigte indessen sehr bald, daß viele Kantsche »Wahrheiten a priori«, wie etwa der Raum, die Zeit u.a., in Wirklichkeit empirischen Charakter haben, also höchst irdischen Ursprungs sind; natürlich haben sie einen Bedeutungswandel durchgemacht und dabei die konkreten Besonderheiten jener Erscheinungen verloren, auf deren Grundlage sie entstanden sind.

Heisenberg bemerkte einmal, daß wir heute viel besser als frühere Generationen verstehen, daß es keinen sicheren

Ausgangspunkt gebe, von dem die Wege in alle Gebiete unserer Erkenntnis ausgehen, vielmehr schwebe unsere gesamte Erkenntnis über einem bodenlosen Abgrund. Wir müßten immer irgendwo in der Mitte anfangen und bei der Erörterung der Wirklichkeit Begriffe verwenden, die erst durch ihre Anwendung allmählich einen bestimmten Sinn erlangen.

Die physikalische Realität ist ein sehr weitgehender Begriff, und wie bei allen weitreichenden Begriffen unserer Sprache ist auch dessen Sinn nicht eindeutig. Es handelt sich dabei um einen primären Begriff, der sich nicht hinreichend streng durch noch einfachere Begriffe logisch definieren läßt. Man muß ihn akzeptieren, nachdem man ihm zuvor jenen Sinn untergelegt hat, den uns unser gesamtes bisheriges Wissen diktiert. Offenbar verändert sich dieser Sinn mit fortschreitender Entwicklung der Wissenschaft ebenso wie der Sinn des Begriffes Atom.

Unsere früheren Vorfahren glaubten, daß ihnen allein die fünf Sinne ein richtiges Abbild von der Realität vermittelten, da es ihnen mit ihrer Hilfe gelang, realen Gefahren zu entgehen und zu überleben. Auf dieser Entwicklungsetappe gruppierte und analysierte das Bewußtsein nur die Angaben unserer Sinne.

Es kamen andere Zeiten, und das Bewußtsein begann selbst »Realität« zu schaffen: Es entwarf detaillierte Bilder der Hölle und des Paradieses und strebte nach einer klaren Vorstellung von der »Dreieinigkeit« Gottes.

Dann kam die Zeit des berfreienden Zweifels: Man darf den Sinneseindrücken nicht uneingeschränkt vertrauen (wir nehmen die Bewegung der Erde nicht wahr, und sie bewegt sich doch), aber auch die Schlußfolgerungen des Bewußtseins müssen durch das Experiment überprüft werden (die Sterne, in denen man früher die Seelen der Dahingeschiedenen oder auch die Laternen der Engel sah, erwiesen sich als ferne Sonnen und nichts anderes).

Mit der Herausbildung der Wissenschaft verwandelte sich der Begriff von der Realität sehr stark, und der Realitätsbegriff eines Menschen des 20. Jahrhunderts ist von dem der alten Griechen ebenso weit entfernt wie das moderne Atommodell von der Atomvorstellung Demokrits.

Die entscheidenden Züge im neuen Bild von der physikalischen Realität hat die Quantenmechanik geprägt. Das ist wohl auch der Hauptgrund für den Wunsch vieler Men-

schen, zu begreifen, was die Quantenmechanik eigentlich ist. Aber es ist nicht der einzige Grund dafür. Er liegt tiefer. Beim Studium der Quantenmechanik gewinnt der Mensch nicht nur fachliche Fertigkeiten, mit deren Hilfe er einen Laser oder einen Kernreaktor berechnen kann. Das Kennenlernen der Quantenmechanik ist in gewissem Sinne ein emotionaler Prozeß, der uns zwingt, ihre gesamte Geschichte nachzuvollziehen. Wie jeder nichtlogische Prozeß ist er streng individuell; er hinterläßt im Bewußtsein des Menschen unauslöschliche Spuren. Das einmal erworbene abstrakte Wissen beeinflußt den gesamten Menschen, sein Verhältnis zur Physik, zu anderen Wissenschaften und sogar seine moralischen Anschauungen. Wahrscheinlich verändert das Studium der Musik den Menschen in der gleichen Weise.

Natürlich kann man kein Musiker werden, indem man — auch wenn es täglich geschieht — Konzerte besucht. Dazu muß man zunächst lange und hartnäckig auf einem Instrument üben. Bei der Bekanntschaft mit einer beliebigen Wissenschaft tritt irgendwann einmal der Augenblick ein, wo sich der Mensch entscheiden muß, ob er sich ihr ganz widmet oder nicht. In dem einen Fall genügt es, sich die Begriffe und Bilder der Wissenschaft anzueignen und — wer es kann — eine Empfindung von ihrer Schönheit zu gewinnen. Im zweiten Fall muß das Handwerk erlernt werden. Man muß die Wechselbeziehung der Begriffe untereinander und die Verfahren zu ihrer Darstellung in der Sprache der Mathematik studieren. Wer diesen Schritt nicht geht, wird nie die Freude des Meisters und Musikers empfinden können.

Wenn Sie dieses Buch gelesen haben, kennen Sie nur die »ersten Noten« der Quantenmechanik, und Sie haben vielleicht sogar gelernt, einige »wohlklingende Akkorde« in den Griff zu bekommen. Natürlich vermag nur ein Musiker die ganze Tiefe eines musikalischen Einfalls zu schätzen, und nur der Physiker ist imstande, die innere Struktur der Formeln als Schönheit zu empfinden und so ästhetische Befriedigung zu gewinnen. Diejenigen unter uns, die sich der Wissenschaft widmen, werden das im Laufe der Zeit vielleicht verstehen. Doch wenn Sie, auch ohne in die »Harmoniegesetze« der Quantenmechanik einzudringen, trotz allem die Schönheit ihrer »Melodie« empfanden, dann hat unser Bericht seine Aufgabe erfüllt.

Der Olymp der Quantenmechanik

Der schwedische Wissenschaftler und Industrielle Alfred Nobel (1833—1896), der durch die Erfindung des Dynamits zu Reichtum gekommen war, vermachte der Schwedischen Akademie der Wissenschaften eine hohe Summe mit der Auflage, daß die Zinsen dieses Gelds alljährlich für die Auszeichnung von Wissenschaftlern verwendet werden, die hervorragende Leistungen auf dem Gebiet der Physik, Chemie und Medizin sowie der Literatur vollbracht haben.

Der erste Nobelpreis für Physik wurde 1901 Wilhelm Conrad Röntgen zuerkannt, und seit jener Zeit ist der Titel eines Nobelpreisträgers eine der höchsten Anerkennungen wissenschaftlichen Verdienstes geworden. Bemerkenswert, daß der Nobelpreis dreißig Jahre lang fast jährlich für Entdeckungen auf dem Gebiet der Atomphysik verliehen wurde. Diese Anerkennung eines doch recht schmalen Bereichs der Physik kommt nicht von ungefähr. Die Erkenntnisse der Atomforschung haben unser physikalisches Weltbild in der Tat verändert.

Unter den Nobelpreisträgern findet man Namen aller bedeutenden Physiker, die das Gebäude der Quantenmechanik errichtet haben. Liest man die Reihe dieser Namen, dann durchläuft man in Gedanken noch einmal seine ereignisreiche Geschichte.

Folgenden Wissenschaftlern wurde dieser Preis verliehen:

1901

Wilhelm Conrad Röntgen (1845—1923) — »als Anerkennung des außerordentlichen Verdienstes, das er sich durch die Entdeckung der nach ihm benannten Strahlen erworben hat«.

1902

Hendrik Antoon Lorentz (1853—1928) und Pieter Zeeman (1865—1943) — »als Anerkennung des außerordentlichen Verdienstes, das beide sich durch ihre Untersuchungen über den Einfluß des Magnetismus auf die Strahlungsphänomene erworben haben«.

1903

Henri Becquerel (1852—1908) — »als Anerkennung des

außerordentlichen Verdienstes, das er sich durch die Entdeckung der spontanen Radioaktivität erworben hat«.

Pierre Curie (1859—1906) und Marie Sklodowska-Curie (1867—1934) — »als Anerkennung des außerordentlichen Verdienstes, das sich beide durch ihre gemeinsamen Arbeiten über die von Henri Becquerel entdeckten Strahlungsphänomene erworben haben«.

1904

Lord Rayleigh (John William Strutt) (1842—1919) — »für seine Untersuchungen über die Dichte der wichtigsten Gase sowie für seine damit gemachte Entdeckung des Argons«.

Sir William Ramsay (1852—1916) — »für seine Entdekkung der Edelgase in der Luft und die Bestimmung ihres Platzes im Periodensystem«.

1905

Philipp Lenard (1862—1947) — »für seine Arbeiten über die Katodenstrahlen«.

1906

Joseph John Thomson (1856—1940) — »für das große Verdienst, das er sich durch seine theoretischen und expetimentellen Untersuchungen über den Durchgang der Elektrizität durch Gase erworben hat«.

1907

Albert Abraham Michelson (1852—1931) — »für seine optischen Präzisionsinstrumente und seine damit ausgeführten spektroskopischen und metrologischen Untersuchungen«.

1908

Ernest Rutherford (1871—1937)— »für seine Untersuchungen über den Elementarzerfall und die Aufstellung seines Atommodells«.

1911

Marie Sklodowska-Curie (1867—1934) — »für die Entdeckung der Elemente Radium und Polonium, für die Charakterisierung des Radiums und dessen Isolierung in metallischem Zustand sowie für ihre Untersuchungen über die chemischen Verbindungen dieses wichtigen Elementes«.

Wilhelm Wien (1864—1928) — »für seine Entdeckung betreffend die Gesetze der Wärmestrahlung«.

1914

Max von Laue (1879—1960 — »für seine Entdeckung der Diffraktion der Röntgenstrahlen in Kristallen«.

1915

William Henry Bragg (1862—1942) und William Lawrence Bragg (geb. 1890) — »für ihre Verdienste um die Erforschung von Kristallstrukturen mittels Röntgenstrahlen«.

1917

Charles Glover Barkla (1877—1944) — »für die Entdeckung der charakteristischen Röntgenstrahlen der Elemente«.

1918

Max Planck (1858—1947) — »als Anerkennung des Verdienstes, das er sich durch seine Quantentheorie um die Entwicklung der Physik erworben hat«.

1919

Johannes Stark (1874—1957) — »für die Entdeckung des Dopplereffektes an Kanalstrahlen und der Zerlegung der Spektrallinien im elektrischen Feld«.

1921

Albert Einstein (1879—1955) — »für seine Verdienste um die theoretische Physik, besonders für die Entdeckung der Gesetze des photoelektrischen Effektes«.

Frederic Soddy (1877—1956) — »für seinen Beitrag zu unserem Wissen um die Chemie der radioaktiven Stoffe und seine Untersuchungen zum Ursprung und der Natur der Isotope«.

1922

Niels Bohr (1885—1962) — »für seine Verdienste um die Erforschung der Struktur der Atome und der von ihnen ausgehenden Strahlung«.

Francis William Aston (1877—1945) — »für die Entdeckung einer großen Zahl von Isotopen in mehreren nicht radioaktiven Elementen mit Hilfe seines Massenspektrographen sowie für seine Entdeckung der sogenannten Regel der Kernsystematik«.

1923

Robert Andrews Millikan (1868—1953) — »für seine Arbeiten über die elektrische Elementarladung sowie über den photoelektrischen Effekt«.

1924

Karl Manne Georg Siegbahn (geb. 1886) — »für seine röntgenspektroskopischen Forschungen und Entdeckungen«.

1925
James Franck (1882—1964) und Gustav Hertz (geb. 1887) — »für ihre Entdeckung der Gesetze über den Zusammenstoß eines Elektrons mit einem Atom«.

1926
Jean Perrin (1870—1942) — »für seine Arbeiten über die diskontinuierliche Struktur der Materie, besonders für seine Entdeckung des Sedimentationsgleichgewichts«.

1927
Arthur Holly Compton (1892—1962) — »für die Entdeckung des nach ihm benannten Effektes«.
Charles Thomson Rees Wilson (1869—1959) — »für die Entdeckung der Methode, durch Dampfkondensierung die Bahnen elektrisch geladener Partikeln sichtbar zu machen«.

1929
Louis Victor de Broglie (geb. 1892) — »für die Entdeckung der Wellennatur der Elektronen«.

1932
Werner Heisenberg (geb. 1901) — »für die Begründung der Quantenmechanik, deren Anwendung zur Entdeckung der Allotropen des Wasserstoffs geführt hat«.

1933
Erwin Schrödinger (1887—1961) und Paul Adrien Maurice Dirac (geb. 1902) — »für ihre Entwicklung neuer fruchtbarer Formen der Atomtheorie«.

1934
Harold Clayton Urey (geb. 1893) — »für seine Entdeckung des schweren Wasserstoffs«.

1935
Jean-Frédéric Joliot (1900—1958) und Irène Joliot-Curie (1897—1956) — »für ihre gemeinsam durchgeführte Synthese von neuen radioaktiven Elementen«.

1937
Clinton Joseph Davisson (1881—1958) und George Paget Thomson (geb. 1892) — »für ihre experimentelle Entdeckung der Beugung von Elektronen durch Kristalle«.

1945
Wolfgang Pauli (1900—1958) — »für die Entdeckung des als Pauli-Prinzip bezeichneten Ausschlußprinzips«.

1951

Edwin Mattison McMillan (geb. 1907) und Glenn Theodore Seaborg (geb. 1912) — »für die epochemachende Entdeckung mehrerer neuer chemischer Grundstoffe«.

1954

Max Born (1882—1970) — »für die statistische Deutung der Quantenmechanik und seine Kristallgittertheorie«.

Linus Carl Pauling (geb. 1901) — »für seine Forschungsarbeiten zur Natur der chemischen Bindung und ihre Anwendung zur Erklärung der Struktur komplizierter Stoffe«.

1955

Edward William Lamb (geb. 1913) — »für seine Entdeckung über die Feinstruktur des Wasserstoffspektrums«.

Polycarp Kusch (geb. 1911) — »für seine Präzisionsbestimmung des magnetischen Moments des Elektrons«.

1958

Igor Jewgenjewitsch Tamm (1895—1971), Pawel Alexandrowitsch Tscherenkov (geb. 1904) und Ilja Michailowitsch Frank (geb. 1908) — »für die Erforschung und Deutung von Lichtstrahlung beim Durchdringen eines energiereichen Elektrons durch Materie«.

1961

Rudolf Ludwig Mößbauer (geb. 1929) — »für seine Untersuchungen über die Resonanzabsorption der Gammastrahlen und die Entdeckung des nach ihm benannten Effektes«.

1962

Lew Dawidowitsch Landau (1908—1968) — »für seine bahnbrechende Theorie der kondensierten Zustände, insbesondere des flüssigen Heliums«.

1964

Nikolai Gennadijewitsch Bassow (geb. 1922), Alexander Michailowitsch Prochorow (geb. 1916) und Charles Townes (geb. 1915) — »für die von ihnen durchgeführten grundlegenden Arbeiten auf dem Gebiet der Quantenelektronik, die zur Schaffung von Generatoren und Verstärkern geführt haben«.

Die Praxis ist der Prüfstein

Kürzlich habe ich einen Physiker in der Hitze des Gefechts sagen hören: »Im Prinzip genügt es sogar zur Beschreibung eines so komplizierten Systems, wie es der Mensch darstellt, das Coulombsche Gesetz und die Gleichungen der Quantenmechanik zu kennen.«

Derartige Behauptungen sind in der Wissenschaft nicht neu. Um die Erde aus den Angeln zu heben, wollte Archimedes (287—221 v.u.Z.) nicht mehr verwenden als einen festen Punkt für den entsprechenden Hebel, und Pierre-Simon Laplace (1749—1827) wollte die Zukunft der Welt vorhersagen, wenn ihm nur jemand die Anfangskoordinaten und -impulse aller Teilchen des Weltalls angebe. Wie erhebend dieser Glaube an die Vollendung und Allmacht der Wissenschaft auch immer sein mag, ist es doch gut, stets auch einer Warnung Roger Bacons (1214—1294) eingedenk zu sein, die heute ebenso gilt wie vor 700 Jahren: »Lebte der Mensch im Tal der Sterblichen selbst viele tausend Jahre lang, er würde auch dann keine Vollkommenheit des Wissens erreichen; er begreift heute nicht die Natur einer Fliege, doch einige selbstgefällige Doktoren glauben, daß die Entwicklung der Philosophie abgeschlossen sei!«

Roger Bacon war ein Franziskanermönch, der in Oxford studierte und an einer der ersten Universitäten der Welt lehrte, die kurz vor seiner Geburt gegründet worden war.

»Es gibt vier größte Hindernisse auf dem Weg zur Wahrheit«, schrieb er. »Sie behindern alle und deshalb auch jeden weisen Mann, so daß es kaum möglich ist, wahre Weisheit zu erlangen. Es sind dies: das Beispiel kläglicher und unwürdiger Autoritäten, die Macht der Gewohnheit, die Meinung der Unkundigen und das Verbergen der eigenen Unwissenheit durch vorgetäuschte Weisheit.«

Roger Bacons Lehre paßte den ehrwürdigen Kirchenvätern nicht, und deshalb warfen sie ihn für siebzehn Jahre in den Kerker.

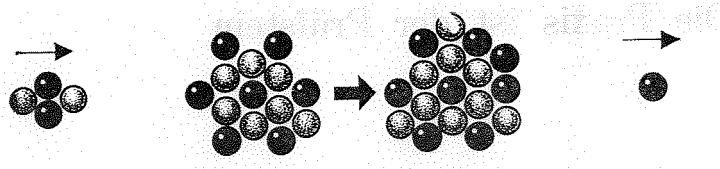

Abb. 48. Kernspaltungsversuch von Rutherford

Es war die Epoche der Kreuzzüge, die Blütezeit religiöser Glaubenslehren und ihrer Verschmelzung mit der Philosophie und der christlichen Mystik. Grundlage aller Bildung war die Theologie, und das Leben der Heiligen galt als moralisch-ethisches Leitbild. Die Bedeutung der Kirche war derart groß, daß die Päpste den Königen das Recht auf die weltliche Macht streitig machten. Nichts deutete auf einen Zusammenbruch des ganzen Systems der mittelalterlichen Wertvorstellungen hin, und doch sollte der religiöse Glaube alsbald der wissenschaftlichen Erkenntnis und die mystische Prophetie dem rationalen Experiment Platz machen.

Wir sind heute Zeugen der Blüte eines neuen Systems der Wertvorstellungen, das nichts auf »Treu und Glauben« akzeptiert und dessen Grundlage die Wissenschaft ist. Die Leistungsfähigkeit der Wissenschaft vermag selbst den erfahrenen Zeitgenossen in Erstaunen zu versetzen: Die Wissenschaft vermochte den Atomkern zu spalten, sie ließ Mondflüge Wirklichkeit werden und entdeckte die Gesetze der Genetik...

Doch gerade in einer Situation allgemeiner Begeisterung begreift man oft nicht so recht, worin das Wesen der wissenschaftlichen Methode und die Quellen ihrer Macht liegen, ganz zu schweigen davon, daß man keine Vorstellung von ihren Grenzen hat. Die Wissenschaft von der Wissenschaft ist erst im Werden. Aber selbst ohne genaue Kenntnis der Entwicklungsgesetze der Wissenschaft ist es immer interessant, ihre Quellen und charakteristischen Besonderheiten zu verfolgen. Dies läßt uns den Platz und die Rolle der Quantenmechanik im Gesamtsystem menschlichen Wissens besser verstehen.

Das Wissen aus ältesten Zeiten ging verloren oder wurde uns nur in Form einzelner Bruchstücke überliefert. Freilich — sie sind systemlos, unserem Geiste fremd, sie erscheinen uns naiv.

An den Quellen der Wissenschaft von heute stehen die alten Griechen. Sie sind nicht nur zeitlich, sondern vor allem auch geistig unsere Vorläufer. Die Griechen »erfanden« den Beweis. Weder in Ägypten noch in Mesopotamien oder im alten China kam eine ähnliche Idee auf, vielleicht deshalb, weil diese Staaten von Anfang an auf Tyrannei und unbedingter Unterordnung unter die Autoritäten begründet waren. Unter derartigen Verhältnissen erscheint allein der Gedanke an die Möglichkeit vernünftiger Beweise unsinnig.

In Athen entstand die erste Republik der Weltgeschichte. Wir wollen sie nicht sonderlich idealisieren. Sie erblühte aus der Arbeit ihrer Sklaven. Trotzdem gab es im alten Griechenland eine Zeitlang Verhältnisse, unter denen ein freier Meinungsaustausch möglich war, und diese Bedingungen lösten eine nie dagewesene Blüte der Wissenschaft aus. Hier entstanden die ersten Keime der wissenschaftlichen Methode, mit deren Hilfe die Griechen den Versuch unternahmen, ein ganzheitliches Weltbild zu entwerfen.

Im Mittelalter verblaßte das Bedürfnis nach rationaler Naturerkenntnis völlig neben den Versuchen, den Platz des Menschen in der Welt unter dem Aspekt der verschiedenen religiösen Glaubenslehren zu begreifen. Fast zehn Jahrhunderte lang gab die Religion erschöpfende Antworten auf alle Fragen des Seins. Diese Antworten standen außerhalb jeder Diskussion — von Kritik ganz zu schweigen —, und der Verstand war dem Glauben bedingungslos untergeordnet.

Die Werke Euklids (4. Jh. v.u.Z.) waren ins Lateinische übersetzt und im 12. Jahrhundert in Europa bekannt geworden. Freilich faßte man sie damals einfach als eine Sammlung scharfsinniger Vorschriften auf, die auswendig zu lernen waren — so fremd waren sie dem Geist des mittelalterlichen Europas, das zu glauben gewöhnt war und nicht nach den Wurzeln der Wahrheit suchte. Aber der Umfang des Wissens wuchs mit Windeseile, und bald war

keinerlei Abstimmung mit der Geisteshaltung des Mittelalters mehr möglich.

Man bringt das Ende des Mittelalters gewöhnlich mit der Entdeckung Amerikas im Jahre 1492 in Verbindung. Andere geben sogar ein noch exakteres Datum, nämlich den 13. Dezember 1250 an, den Tag, an dem König Friedrich II. von Hohenstaufen im Schloß Fiorentino bei Luzern starb. Gewiß, solche Daten sind nicht allzu ernst zu nehmen, und trotzdem ergeben einige von ihnen den nicht zu bezweifelnden Eindruck, daß an der Wende vom 13. zum 14. Jahrhundert im Bewußtsein der Menschen tatsächlich ein Umbruch einsetzte. Diese Periode wird in der Geschichte als Renaissance bezeichnet.

In Europa kam es zu einer Wiedergeburt der Grundlagen alter Kenntnisse, die bis dahin über zehn Jahrhunderte lang in Vergessenheit geraten waren.

In der Renaissance erfolgte im Denken der Menschen eine Abwendung von dem Streben, den eigenen Platz in der Welt in religiöser Demut zu bestimmen, und die Hinwendung zu den Versuchen, den rationalen Aufbau der Welt ohne allen Wunderglauben und göttliche Offenbarungen zu verstehen. Zunächst trug diese Umwälzung fast aristokratischen Charakter, doch mit Hilfe der Buchdrukkerkunst gelangten die neuen Ideen alsbald in alle Schichten der Bevölkerung.

Das Wesen dieser Umwälzung bestand in der Befreiung vom Druck der Autoritäten und im Übergang vom mittelalterlichen Glauben zum Wissen der neuen Zeit. Die Kirche stellte sich diesen Tendenzen mit allen ihr zu Gebote stehenden Mitteln entgegen; sie ging unbarmherzig mit allen Philosophen ins Gericht, die der Meinung waren, daß es unter dem Aspekt der Philosophie richtige, doch unter dem Aspekt des Glaubens falsche Dinge gäbe, »als könne die Wahrheit aus den Büchern der Ketzer ein Gegengewicht zu der Wahrheit sein, die in der Heiligen Schrift beschlossen liegt«.

Wenn man einmal von den politischen Kämpfen jener Zeit absieht, dann wird klar, daß man Galileo Galilei (1564—1642) keineswegs nur wegen seines Eintretens für das kopernikanische System verurteilte. Gedanken gleicher Art hatte Jahrhunderte früher schon der Kardinal Nicolaus Cusanus (Nikolaus von Kues, 1401—1464) geäußert. Und er war dafür nicht bestraft worden. Der gelehrte Kar-

dinal hatte seine Auffassungen behauptet und sich dabei auf Autoritäten berufen, wie es dem Gläubigen ziemt. Galilei hingegen bewies die gleichen Gedanken, wie das die Wissenschaft verlangt, d.h., er forderte jeden auf, sich selbst davon mit Hilfe des Experiments und des gesunden Menschenverstandes zu überzeugen. Gerade das konnten ihm die Pfaffen nicht verzeihen.

Doch der einbrechende Damm des Glaubens war nicht mehr zu reparieren, und der Geist — einmal in Freiheit gelangt — begann sich neue Entwicklungswege zu suchen.

Nach endlos scheinender Unterjochung durch die Autoritäten verfiel man jetzt ins andere Extrem: Es brach eine Periode allgemeinen Zweifelns an. Man stellte alles in Frage. Man zweifelte daran, daß die Sinne eine richtige Vorstellung von der Welt liefern, und daran, daß das Bewußtsein imstande sei, sich vor Irrtümern der Auffassungen und der Empfindungen zu bewahren, ja man zweifelte selbst an der Realität der eigenen Existenz.

Es war die Zeit, als man die Stütze des Glaubens verloren und die Sicherheit des Verstandes noch nicht gewonnen hatte. Mehr noch: Es schien, als müsse man wegen der Unvollkommenheit des Verstandes alle Hoffnung fahren lassen, die Wahrheit auf dem Wege der Erkenntnis jemals zu erreichen. Erst ganz allmählich gewann der Verstand an Kraft und schuf Schritt um Schritt jene Methode, die ihn vor Fehlern zu bewahren vermochte.

Die Prinzipien der wissenschaftlichen Erkenntnis und die Methode zu ihrer Realisierung waren schon lange vor der Entstehung der modernen Wissenschaft gesucht worden. Bereits im 13. Jahrhundert hatte Roger Bacon in seinem Traktat »Opus tertium« geschrieben: »Es existiert die natürliche und unvollkommene Erfahrung, die ihre Macht nicht erkennt und sich keine Rechenschaft über ihr Vorgehen gibt. Ihrer bedienen sich nur Handwerker, aber keine Wissenschaftler... Über allen rein gedanklichen Kenntnissen und Künsten steht die Fähigkeit, Experimente auszuführen, und diese Wissenschaft ist die Königin aller Wissenschaften...

Die Philosophen müssen wissen, daß ihre Wissenschaft kraftlos ist, wenn sie nicht die mächtige Mathematik darauf anwenden... Ein Sophismus ist von einem Beweis nicht zu unterscheiden, wenn man die Folgerungen nicht durch Experiment und Anwendung nachprüft.«

Im Jahre 1440 hatte Nicolaus Cusanus in dem Buch »Über die gelehrte Unwissenheit« gefordert, daß alle Erkenntnisse über die Natur in Form von Zahlen aufgeschrieben und alle Experimente an der Natur mit der Waage in der Hand ausgeführt werden müssen.

Die neuen Ansichten setzten sich langsam durch. Obwohl die arabischen Ziffern bereits im 10. Jahrhundert allgemein in Gebrauch gekommen waren, führte man selbst im 16. Jahrhundert Berechnungen allenthalben nicht auf dem Papier, sondern mit Hilfe besonderer Rechenmarken (Jetons) aus, die noch unvollkommener waren als unsere Rechenbretter. Die eigentliche Geschichte der wissenschaftlichen Methode beginnt mit Galileo Galilei (1564—1642) und Isaac Newton (1643—1727). Aus der gleichen Tradition heraus gilt Galileo Galilei als der Ahnherr der experimentellen Physik und Isaac Newton als der Begründer der theoretischen Physik. Freilich existierte zu ihrer Zeit diese Unterteilung nicht, und die Physik selbst hieß damals noch Naturphilosophie. Aber diese Unterteilung hat einen tiefen Sinn: Mit ihrer Hilfe lassen sich die Besonderheiten der wissenschaftlichen Methode verstehen, und sie ist im Grunde genommen der Untergliederung der Wissenschaft in Experiment und Mathematik äquivalent, wie sie Roger Bacon formuliert hat.

Wesen und Entwicklung der wissenschaftlichen Methode

Wir haben uns so sehr daran gewöhnt, die Begriffe Wissen und Wissenschaft miteinander gleichzusetzen, daß wir uns überhaupt keinerlei anderes Wissen als eben »wissenschaftliches Wissen« vorstellen können. Worin bestehen sein Wesen und seine Besonderheiten?

Das Wesen der wissenschaftlichen Methode kann man recht einfach erklären: Diese Methode erlaubt die Erlangung solcher Kenntnisse von den Erscheinungen, die sich überprüfen, aufbewahren und an andere weitergeben lassen.

Hieraus folgt sogleich, daß die Wissenschaft nicht beliebige Erscheinungen schlechthin untersucht, sondern nur jene, die sich wiederholen. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, die Gesetze aufzufinden, nach denen sich die Erscheinungen vollziehen. Dieses Ziel erreichte die Wissenschaft zu verschiedenen Zeiten auf unterschiedliche Art.

Die alten Griechen beobachteten die Erscheinungen auf-

merksam und versuchten dann, rein gedanklich — mit Hilfe von Spekulationen — in die »Harmonie« der Natur einzudringen, wobei sie sich einzig auf die im Gedächtnis gespeicherten Angaben der Sinnesorgane stützten.

In der Renaissance wurde offensichtlich, daß jenes Ziel nicht ausschließlich mit Hilfe der fünf Sinne erreicht werden kann, sondern daß dafür Geräte erfunden werden müssen, die nichts anderes darstellen als eine Verlängerung und Vertiefung des Wirkungsbereichs unserer Sinnesorgane. Dabei ergaben sich zwei Fragen: In welchem Maße darf man den Anzeigen der Geräte vertrauen, und wie soll die mit ihrer Hilfe gewonnene Information gespeichert werden?

Die zweite Aufgabe wurde alsbald durch die Erfindung des Buchdrucks sowie durch konsequenten Einsatz der Mathematik in den Naturwissenschaften gelöst. Erheblich schwieriger war die Lösung der ersten Frage bezüglich der Vertrauenswürdigkeit allen mit Hilfe von Instrumenten erworbenen Wissens. Im Grunde genommen ist diese Frage bis heute nicht endgültig gelöst, und die gesamte Geschichte der wissenschaftlichen Methode ist eine Geschichte ihrer ständigen Vertiefung und Modifizierung.

Verhältnismäßig rasch begriff man, daß man den Geräteanzeigen in der Regel vertrauen kann, d.h., daß sie wirklich etwas Reales, in der Natur Existierendes widerspiegeln, das unabhängig von den Meßgeräten existiert. (So überzeugte man sich ja schließlich beispielsweise auch davon, daß die Sonnenflecken wirklich Flecken auf der Sonne und nicht Fehler des Fernrohrs sind, mit dessen Hilfe sie entdeckt worden waren.) In dieser Periode des Aufblühens der Experimentalphysik wurde all jenes Wissen akkumuliert, auf dessen Grundlage sich zu Ende des vorigen Jahrhunderts ein außerordentlich bedeutsamer Sprung in der Technik vollzog.

Doch der Umfang des Wissens wuchs rasch und führte zu Beginn unseres Jahrhunderts zu einer Krise in der Physik, weil sich die neuen Erkenntnisse nicht mehr in die erkennbar abgerundete, widerspruchsfreie Welt der bisherigen physikalischen Anschauungen einfügen ließen und weil die Grundeinstellung vieler Physiker zur Naturwissenschaft von der Weltanschauung der herrschenden Bourgeoisie geprägt war, die ihre Gesellschaftsordnung als etwas Abgeschlossenes betrachtete und jeden Gedanken ab-

lehnte, der zu umwälzenden Erkenntnissen führen konnte. Die Krise der Physik trat äußerlich dadurch in Erscheinung, daß die Physiker, die von den erkenntnistheoretischen Voraussetzungen der herrschenden bürgerlichen Philosophie ausgingen, von einem bestimmten Zeitpunkt an nicht mehr zu begreifen vermochten, in welchem Verhältnis die mit Hilfe der Geräte erhaltenen Zahlen zu den realen Erscheinungen in der Natur stehen. Eben in diesem Augenblick gewann die theoretische Physik entscheidende Bedeutung, da ihre Erkenntnisse die objektive Realität auf höherer Ebene — auf der Grundlage einer dialektisch-materialistischen Betrachtungsweise — exakter widerspiegelten. Für die unmittelbar an der Formulierung beteiligten Physiker stellte sich das Problem folgendermaßen dar: Einerseits hatten sich die Geräte zu weit von den unmittelbaren Empfindungen des Menschen entfernt, und darum lieferte die von ihren Angaben geleitete Intuition kein einfaches Bild der untersuchten Erscheinungen. Damit waren die Möglichkeiten einer anschaulichen Interpretation der Versuchsdaten erschöpft. Andererseits existierte kein logisches Schema, das zur Ordnung der wissenschaftlichen Tatsachen beigetragen und ohne Bezugnahme auf die Intuition zu beobachtbaren Folgerungen solcher Art geführt hätte, gegen die auch vom gesunden Menschenverstand aus nichts einzuwenden gewesen wäre.

Gab es einen Ausweg? Man vertraute nach wie vor auf die Geräteanzeigen, erfand jedoch Begriffe und logische Schemata, die uns ein neues Verhältnis zu diesen Anzeigen lehrten. Die entscheidende Rolle bei diesem geistigen Umbruch spielte die Quantenmechanik. Sie gab uns nicht nur die Macht über die völlig neue Welt der atomaren Erscheinungen, sondern sie überzeugte uns auch davon, daß die Aussagen der Meßgeräte keine bloße Fotografie der Naturerscheinungen sind. Die Angaben beziehen sich nicht unmittelbar auf die Natur, sondern spiegeln lediglich eine ihrer Seiten im Verein mit unserer Vorstellung darüber wider und halten sie in Zahlen fest.

Im Laufe der Zeit erfahren diese Kenntnisse eine Vervollkommnung, so daß die korrekte Vorhersage immer detaillierterer Naturerscheinungen möglich wird. Diese Tatsache ist an und für sich erstaunlich, und wahrscheinlich werden wir sie nie so recht begreifen, doch da sie nun einmal bekannt geworden ist, benutzen wir sie.

Diesen Standpunkt akzeptieren heute nahezu alle Physiker. Wie andere Menschen auch wollen sie indessen mehr verstehen als das. Wie vollständig ist das von der Physik beschriebene Weltbild? Das aber ist keine physikalische, sondern eine philosophische Frage. Sie stand zu allen Zeiten. Klar formuliert wurde sie erstmals in den Dialogen des Platon (427—347 v.u.Z.).

Platon verglich die Wissenschaftler mit Gefangenen, die in einer Höhle mit dem Rücken zum Eingang angeschmiedet sind, so daß sie das Tageslicht nicht sehen können, sondern nur die Schatten, die sich über die gegenüberliegende Wand bewegen. Er räumte ein, daß man selbst unter solchen Bedingungen lernen kann, das Verhalten jener Körper vorauszusagen, deren Schatten auf der Höhlenwand zu sehen sind, wenn man ihre Bewegungen aufmerksam beobachtet. Doch das auf diesem Wege erworbene Wissen ist unendlich weit von jenem vollständigen Wissen entfernt, das der befreite Gefangene gewinnt, sobald er die Höhle verläßt.

Dagegen läßt sich nichts einwenden. In der Tat ist die uns umgebende Welt sehr viel reicher als jene, die wir uns ausschließlich auf der Grundlage physikalischer Daten vorzustellen imstande sind. Wer von Geburt an blind ist, kann wohl die Optik studieren und mit größter Vollkommenheit beherrschen, und doch wird er nicht die geringste Vorstellung davon haben, was Licht ist, ganz zu schweigen davon, welchen Farbenreichtum der Frühling bringt. Sobald wir in die Welt der atomaren Erscheinungen eintreten, ergeht es uns wie den Blinden. Uns geht »atomares Sehen« völlig ab, und so sind wir gezwungen, uns tastend in einer ungewohnten Welt vorwärtszubewegen.

Die Zahl derartiger Analogien kann leicht vervielfacht werden, und jede von ihnen lehrt die Physiker größere Bescheidenheit. Im 19. Jahrhundert träumte man noch davon, die Natur vollständig zu erklären. Im 20. Jahrhundert bereitet es große Mühe, sie zu beschreiben. Nun begreifen wir, daß Fragen nach der Vollständigkeit physikalischen Wissens und nach dem Wesen der Erscheinungen außerhalb der Physik liegen und mit deren Mitteln nicht gelöst werden können. Die Physik erforscht nur die Gesetze, nach denen die Erscheinungen ablaufen. In diesem Sinne folgt sie exakt der »Schattentheorie«. Aber selbst dieses begrenzte Wissen über die Natur — wie weit entspricht es der Wahrheit?

Wahrheitsgehalt und Vollständigkeit des wissenschaftlichen Weltbildes

Wir vertrauen der Wissenschaft, da sie uns die richtige Vorhersage der Naturerscheinungen erlaubt und auch von der Willkür der Person unabhängig ist, die die Erkenntnis gewonnen hat. Wir können an der Struktur ihrer Abbilder zweifeln, denn sie hängen von der Methode ab, mit der wir verallgemeinern. Aber wir wissen heute mit Sicherheit, daß alle Körper auf der Erde und alle Himmelskörper aus den gleichen Elementen aufgebaut sind, und zwar in etwa den gleichen Proportionen. Wir sind sogar davon überzeugt, daß die Naturgesetze im gesamten Weltall gleich sind und daß das Natriumatom deshalb stets die gleiche D-Linie emittiert, unabhängig davon, ob es sich auf der Erde oder auf dem Sirius befindet. Das erkennen heute fast alle Menschen an, und niemand zweifelt mehr an der Richtigkeit dieser Kenntnisse. Zweifel entstehen erst, sobald wir auf der Grundlage im Einzelfall einwandfrei gesicherter, aber doch spezieller Tatsachen versuchen, ein allgemeingültiges und widerspruchsfreies Weltbild zu schaffen, das der Gesamtheit aller experimentellen Daten und der allgemeinen Natur des menschlichen Bewußtseins entspricht. Am häufigsten entsteht die Frage: Wie eindeutig ist die Form der physikalischen Gesetze?

Eine kategorische Antwort auf diese Frage gibt es nicht. Wer die Wissenschaftsgeschichte kennt, weiß, daß in bestimmten Perioden der Wissenschaftsentwicklung in der Tat zwei Theorien Seite an Seite existierten, deren jede sich für die richtige hielt und die beide alle damals bekannten Erscheinungen gleich gut erklärten. Die gleiche Geschichte indessen weiß auch zu berichten, daß neue Experimente im Laufe der Zeit von zwei derartigen Theorien eben nur eine bestätigten oder daß beide Theorien in einer höheren Entwicklungsphase auf der Grundlage neuer allgemeiner Prinzipien miteinander verschmolzen, wie dies mit der Wellen- und Teilchentheorie des Lichtes geschah.

Die Tatsachen und Begriffe der Wissenschaft könnten zumindest deshalb zufällig erscheinen, weil sie zu zufälligen Zeitpunkten von zufälligen Personen und unter oftmals zufälligen Umständen ermittelt wurden. Doch zusammengenommen bilden sie ein einheitliches gesetzmäßiges System, in dem die Zahl der Querverbindungen so gro

ist, daß man kein einziges Glied darin auswechseln kann, ohne nicht zugleich alle übrigen zu berühren. Unter dem Druck neuer Tatsachen erfährt dieses System unaufhörlich neue Änderungen und Präzisierungen, verliert jedoch niemals seine Ganzheit und seine eigentümliche Geschlossenheit. Insgesamt gesehen ist das wissenschaftliche Begriffssystem Produkt einer langen Evolution: Im Verlauf vieler Jahre sind die alten Glieder darin durch neue vollkommenere Begriffe ersetzt worden, während gänzlich neue Begriffe stets unter Berücksichtigung und auf der Grundlage früherer Begriffe entstanden. Kurz gesagt, die Wissenschaft ist kein erstarrtes, totes System, sondern ein lebendiger, sich entwickelnder Organismus. Und obwohl alle Wissenschaftsbegriffe Schöpfungen des menschlichen Verstandes darstellen, sind sie doch nur in dem Maße zufälligen Charakters, wie das vernunftbegabte Leben in der Natur selbst zufällig ist.

In einer phantastischen Erzählung begibt sich der Held mit Hilfe einer Zeitmaschine in die ferne Vergangenheit, wo er während seines kurzen Aufenthalts versehentlich einen kleinen Schmetterling zerdrückt. Als er zurückkommt, erkennt er die Welt nicht wieder, die er bei der Abreise zurückgelassen hat: Sein ungewollter und auf den ersten Blick ganz unbedeutender Eingriff in den Gang der biologischen Evolution hat alle ihre Endergebnisse völlig verändert.

Nun, dieses Beispiel ist nicht mehr als eine effektvolle Übertreibung, die man der schriftstellerischen Phantasie verzeiht. Keine Frage: Alles in der Natur ist wechselseitig miteinander verbunden. Doch diese Verbindungen beruhen nicht auf einer starren, an den klassischen Determinismus grenzenden Kausalität, sondern sind erfindungsreicher und flexibler in der Art der statistischen Wahrscheinlichkeit der Quantenmechanik. (Andererseits bildet dieses Beispiel einmal mehr eine Warnung vor jedem Eingriff in die Natur, da niemand langfristige Folgen derartiger Handlungen vorauszusehen vermag.)

Die Evolution des wissenschaftlichen Begriffssystems ist ein ebenso unkontrollierter, aber gesetzmäßiger Prozeß wie die Evolution der Lebewesen. Man kann ihn sich in Einzelheiten anders vorstellen oder mag sich über seine absonderlichen Grillen wundern, doch man kann ihn sich nicht insgesamt anders vorstellen. Wir wissen nicht, wie

der erste Begriff und wie der erste Organismus entstanden; ebensowenig können wir sagen, wie heute alles aussähe, wenn sie anders gewesen wären. Doch wir wissen, daß jeder neue Schritt innerhalb der Evolution von allen vorangegangenen abhing. Deshalb können wir uns auch ein Pferd mit Tigerpranken oder ein brezelförmiges Atom leicht vorstellen, doch die Vorstellung einer gänzlich anderen Tierwelt und eines ganz anderen wissenschaftlichen Begriffssystems steht außerhalb unserer Kraft. Der biologische Evolutionsprozeß ebenso wie die Formierung wissenschaftlicher Kenntnisse gehorchen ihren inneren Gesetzen, die wir zu ändern nicht imstande sind und deren endgültige Erkenntnis vorläufig nicht gelang.

Wir werden in eine Welt hineingeboren, in der sich die einzelnen Arten bereits herausgebildet haben und Begriffe schon geprägt sind. Wir können eine neue Pferderasse züchten oder einen Begriff gegen einen anderen austauschen, der der wissenschaftlichen Wahrheit mehr entspricht. Doch die Frage, ob das gesamte System menschlichen Wissens wahr oder falsch ist, liegt außerhalb der Sphäre des Bewußtseins und kann mit dessen Kräften nicht gelöst werden. Mehr noch: Diese Frage ist sinnlos. Die Wissenschaft wurde vom Menschen und für den Menschen geschaffen. Und ihr gesamtes Begriffssystem ist so erdacht, daß es der Natur des menschlichen Bewußtseins entspricht. Das Ziel aller Begriffe besteht in der Vorhersage und Erklärung der Erscheinungen, die unsere Sinnesorgane oder ihre Verlängerungen, die Meßgeräte, beeinflussen.

Wir vermuten, daß irgendwo im All vernunftbegabte Wesen mit anderen Sinnesorganen und einer anderen Bewußtseinsstruktur als bei uns existieren. Vielleicht unterscheidet sich ihr Begriffssystem grundlegend von dem unseren. Doch selbst, wenn wir imstande wären, jenes System so weit zu begreifen, daß wir es mit unserem eigenen vergleichen könnten, ließe sich aus diesem Vergleich nicht der Schluß ziehen, daß es falsch sei. Umgekehrt: Es ist immer richtig, wenn es den Sinnesorganen richtige Vorhersagen liefert. Unsere wissenschaftlichen Kenntnisse von der Welt sind reale Abbilder realer Naturerscheinungen. Sie sind gleichsam die Schatten, die diese Erscheinungen werfen, wenn sie vom Licht unseres Bewußtseins erhellt werden. Genauso wie ein und derselbe Gegenstand verschiedene Schatten werfen kann, abhängig davon, unter welchem Win-

kel er beleuchtet wird, ganz genauso kann sich das System wissenschaftlicher Kenntnisse, geschaffen von vernunftbegabten Wesen eines anderen Planeten, von unserem unterscheiden. Vielleicht werden wir irgendwann einmal in ferner Zukunft imstande sein, zwei derartige »Bewußtseinsschatten« miteinander zu vergleichen, um dann wie Platons Gefangener, der aus seiner Höhle ausgebrochen ist, aus diesem Vergleich die Wahrheit zu erfassen. Man könnte dieses Verfahren mit dem Geschick eines Meisters vergleichen, der ein Teil nach mehreren ebenen Zeichnungsprojektionen anfertigt. Aber solange dies noch nicht geschehen ist, müssen wir unsere Wissenschaft, wie sie heute ist, vertiefen. Bei all ihrer Unvollkommenheit ist es vorläufig das einzige Verfahren, in die Tiefe der beobachteten Erscheinungen einzudringen.

Die Welt ist objektiv und existiert unabhängig von unserem Bewußtsein. Ihr ist es gleichgültig, wie wir — ein Teil dieser Welt — uns die inneren Mechanismen ihrer äußeren Erscheinungsformen vorstellen. Das hat nur für uns selbst Bedeutung. Im Grunde geht es um ein ganz anderes Problem: Wie weit können wir auf diesem Wege voranschreiten? Wie weit werden wir unsere Vorstellungen über die Ursachen der beobachteten Erscheinungen weiter präzisieren können? Nicht das Problem der physikalischen Realität müssen wir lösen, sondern das Problem der Grenzen der wissenschaftlichen Methode, ein Problem also, das nach der Entstehung der Quantenmechanik besonders aktuell geworden ist.

Wissenschaft und Menschheit

Der »moderne« Mensch hat ein skeptisches Verhältnis zu allen »ein für allemal« aufgestellten Prinzipien. Er glaubt nicht an die Endgültigkeit des Wissens und befindet sich in jeder Minute seines Lebens ständig auf der Suche nach optimalen Lösungen. Der während der Renaissance neu erwachte Wissensdurst besteht bis heute fort. Die wissenschaftliche Methode hat die Welt, in der wir leben, entscheidend beeinflußt: Mit ihrer Hilfe entstanden Maschinen, die wir oft wie Lebewesen behandeln. Sie hat dazu beigetragen, viele Menschen gut zu ernähren, gewährt ihnen Schutz vor Krankheiten. Dies wiederum förderte das

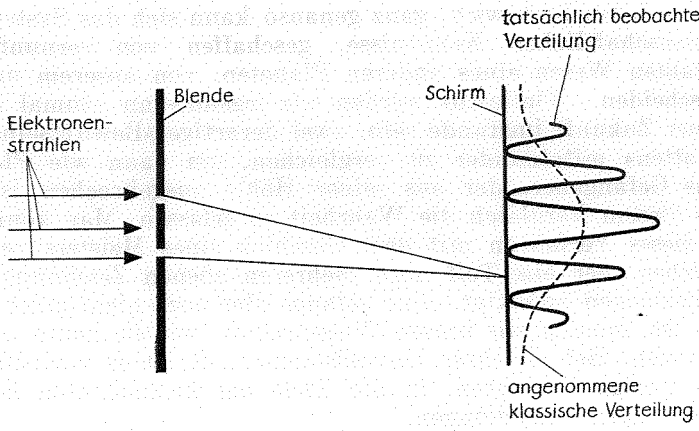

Abb. 49. Elektronenbeugung am Doppelspalt als Frage an die Natur

Wachstum der Anzahl der Menschen in bisher nie gekanntem Maße.

Auf der Grundlage dieser Erfolge ergab sich geradezu eine Art Wissenschaftsgläubigkeit. Man erwartet von der Wissenschaft Antworten auf alle Fragen des Lebens, und ihre Urteile gelten als unanfechtbar. Man sucht sich unter den Dienern der Wissenschaft Vorbilder, und die Zahl ihrer Adepten wächst rascher als in alten Zeiten die Armee buddhistischer Mönche. Doch zum Unterschied von den Religionen, mit deren Hilfe eine Gruppe von Menschen andere unterwarf, verleiht die Wissenschaft dem Menschen Macht über die Natur.

Das Wesen vieler Naturerscheinungen läßt sich in Form von Zahlen beschreiben sowie in Form von Gleichungen, die die Beziehungen zwischen den Zahlen herstellen. Wie jede folgerichtige Methode bedarf auch die wissenschaftliche Methode eines gewissen Aufwandes, und sie besitzt einen Geltungsbereich sowie Anwendungsgrenzen.

Am Ufer des Meeres zu sitzen und zuzusehen, wie die Sonne am Himmel ihre Bahn zieht, und dabei tiefsinnige Betrachtungen anzustellen, galt im Altertum keineswegs als eine Beschäftigung, die eines Mannes unwürdig gewesen wäre. Seither hat sich vieles verändert. Die induktiven Wissenschaften lösten die reine Spekulation ab und mach-

ten sich daran, »die Harmonie mit Hilfe der Algebra nachzuprüfen«. Zwar gewann die Wissenschaft das sichere Fundament des Experiments, aber sie verlor dabei die Züge gelassener Weisheit und ruhiger Beschaulichkeit. Das kann man beklagen — zu ändern ist es längst nicht mehr.

In der Zeit, als die Wissenschaft entstand, war sie die Beschäftigung wissenschaftsbeflissener Einzelgänger, die sich ihr auf eigene Rechnung und Gefahr widmeten. Lange Zeit hielt man ihre Ergebnisse nicht für allgemein verbindlich. Noch in der Mitte des vorigen Jahrhunderts mußte Faraday seine Stimme für die Anerkennung der Wissenschaft als eines Elementes der Allgemeinbildung erheben. In unseren Tagen nun wurde die Wissenschaft zu einer Angelegenheit von Millionen und die wissenschaftliche Arbeit zu einer ganz gewöhnlichen und häufig prosaischen Beschäftigung. Als Werkzeug der Erkenntnis wurde die Wissenschaft zu einer realen Kraft, die produktiv wirksam wurde, geriet aber auch mit menschlichen Leidenschaften in Berührung, die weit abseits von jenen hohen Idealen lagen, denen sie dienen sollte.

Dies alles ist richtig und trifft wirklich zu. Es ist unmöglich, auf die Ergebnisse der Wissenschaft etwa aus moralischen Gründen zu verzichten, weil sie auch mißbraucht werden können. Die Wissenschaft baut Maschinen, ernährt die Menschheit, versorgt sie mit Energie und schützt sie vor Krankheiten. Selbstverständlich enthebt dies die Wissenschaftler nicht der Verantwortung für ihre zuweilen todbringenden Entdeckungen.

Bekanntlich entstehen im Prozeß der biologischen Evolution immer auch Mutationen, von denen ein Teil sich rasch festigt und weniger angepaßte Formen verdrängt. Ein anderer Teil dagegen wird latent konserviert und kommt erst dann zum Vorschein, wenn veränderte äußere Bedingungen die biologische Art zu vernichten drohen. Genau diese zeitweise verdeckten Mutationen spielten auch bei der Entwicklung des Menschen eine große Rolle. Freilich hat die Evolution nicht aufgehört, sondern nur ihre Formen verändert: Im Verlauf von Jahrtausenden ist der Körper des Menschen fast ohne Veränderung geblieben. Dafür hat sich mit der Gesellschaft auch sein Bewußtsein gewandelt. Unter diesen Bedingungen ist die Wissenschaft auch eine Quelle neuer Ideen, die die Menschheit vielleicht vor Katastrophen bewahren.

Die wissenschaftliche Methode ist eine Vereinbarung, die die Menschen untereinander getroffen haben. Sie ist fruchtbar genug, um sich allgemein durchzusetzen. Auf ihrer Grundlage entstand und entwickelt sich der kollektive Verstand der Menschen, der, wenngleich nicht unsterblich, doch relativ langlebig ist. Wie lange er bestehen wird und wo die Grenzen der wissenschaftlichen Methode liegen, ist noch ungewiß.

Grenzen der wissenschaftlichen Methode?

Zu allen Zeiten bewegen die Menschen »ewige Fragen« nach Leben und Tod, nach gut und böse, über den Sinn des Lebens sowie über den Platz des Menschen im Weltall. Die Religion vermochte diese Fragen nicht zu beantworten. Sie war nur imstande, das Streben nach ihrer Lösung für eine kurze Zeit zu beruhigen; sie ließ die Kompliziertheit des irdischen Seins nur für kurze Zeit vergessen.

Auch die Wissenschaft ist nicht gerüstet, Antworten auf alle Fragen zu geben. Geblendet durch die Erfolge der Naturwissenschaften, vergißt man dies oftmals und läßt jene einfache Möglichkeit ganz außer acht, daß zukünftigen Generationen unser Rationalismus und unsere Wissenschaftsgläubigkeit ebenso lächerlich und unverständlich erscheinen könnten wie uns die Zeremonien ägyptischer Priester: Unbegrenzt ist nur die Erkenntnis selbst, nicht jedoch ihre historische Form.

Die Naturwissenschaft vermag nur jene Erscheinungen zu erkennen, deren Eigenschaften man durch Zahlen beschreiben kann. Die Tätigkeit eines Hypnotiseurs läßt sich durch mathematische Formeln nicht beschreiben, und doch sind ihre Ergebnisse unzweifelhaft und reproduzierbar. Die Leistungen des indischen Yogas sind eine mehrfach überprüfte experimentelle Tatsache. Indessen können diese Phänomene nicht Gegenstand der exakten Wissenschaften werden, da sie der quantitativen Beschreibung mit Hilfe der Zahlen und Formeln nicht zugänglich sind. Unsere Zeit anerkennt nur wissenschaftliche Beweise, die den Rang von »Autoritäten« erhalten haben. Und doch gibt es Dinge, die sich nicht einfach in Zahlen und Formeln fassen lassen.

Das aber ist kein Anlaß, betrübt zu sein: Denn es bedeutet doch nur, daß die Welt reicher und komplizierter ist als das Abbild, das uns die Wissenschaft liefert. Ein

Lächeln kostet nichts und ist doch zum Glück durch nichts zu ersetzen. Daran sollte man immer denken, um nicht in gelehrte Unwissenheit zu verfallen. Diejenigen unter den Wissenschaftlern indessen, die versuchen, sich die Welt in Gestalt unendlicher Zahlentabellen vorzustellen und die die Realität vieler Naturerscheinungen einzig mit der Begründung negieren, daß sie mit den Mitteln der Wissenschaft nicht erklärbar sind, unterscheiden sich nur wenig von jenen Pfaffen, die beim Anblick der ersten Lokomotive die Augen bedeckten, mit dem Fuß aufstampften und beschwörend riefen: »Entweiche, Satanas!« Für solche Wissenschaftler sind ein Genie und ein Mörder nicht voneinander zu unterscheiden, da man streng wissenschaftlich beweisen kann, daß beide aus völlig gleichen Molekülen bestehen.

Vor dem Hintergrund solcher Überlegungen muß die Quantenmechanik, von der wir nun so viel erfahren haben, als ganz einfache Wissenschaft erscheinen. In der Tat wissen wir vom Wasserstoffatom so viel, daß wir alle seine beobachtbaren Eigenschaften vorhersagen können. Wesentlich schwieriger, aber immerhin möglich ist die Berechnung der Eigenschaften des Wasserstoffmoleküls. Doch zur Vorhersage der Eigenschaften eines Eiweißmoleküls sind wir noch nicht in der Lage. Und obwohl es gar nicht so viele verschiedene Eiweiße gibt, ist jeder Mensch in seiner ganzen Unwiederholbarkeit daraus aufgebaut.

Kurz gesagt: Die Wissenschaft ist nützlich und notwendig, doch sollte man aus der Not keine Tugend machen und ihr alles mit der Begründung unterordnen, daß wir ohne sie nicht auskommen können.

Wissenschaft und Kunst

Nichts läßt die Grenzen der Wissenschaft so deutlich werden wie Versuche, das Geheimnis der Kunst mit ihren Methoden zu enträtseln. Die Wissenschaft weiß »alles« über das Cello oder über das Klavier: Anzahl, Qualität und Länge der Saiten, Holzart und Zusammensetzung des Leims ebenso wie die letzte Feinheit seiner Konstruktion sind wohlbekannt. Aber sie vermag nicht zu sagen, was eigentlich mit dieser polierten Kiste geschieht, solbald sich ein großer Pianist daransetzt. Vielleicht muß das aber gar nicht sein: Wer über einem Buch in Tränen ausbrach,

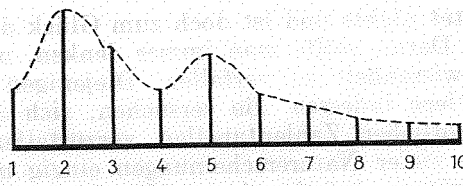

Abb. 50. Intensität der Obertöne eines Cellos bei 280 Hz mit Hüllkurve (gestrichelt)

will meist nicht wissen, mit welchen Mitteln sein Verfasser dies erreichte. Sicher, er kann später eine Kritik — doppelt so dick wie das Buch — lesen und darüber erstaunt sein, doch erinnert das stets ein wenig an das Präparieren von Leichen in der Anatomie: Der Fachmann muß es tun, aber dem Laien ist es unangenehm. (Das Rezept des Marc Aurel lautete: »Um das Singen und Tanzen zu verachten, genügt es, beide in ihre Bestandteile zu zerlegen.«) Doch die Kunst ist weise: Sie hat die unmittelbare Echtheit emotionaler Empfindungen noch immer vor den hartnäckigen Enträtselungsversuchen der Wissenschaft zu bewahren gewußt und wurde wegen ihrer Fähigkeit, »... an Harmonien zu gemahnen, die systematischer Analyse nicht zugänglich sind «, zu allen Zeiten hoch geschätzt.

Wer immer will, kann sich darüber klar werden, wie ein Atommeiler konstruiert ist, auch wenn er ihn noch nie gesehen hat. Doch der Zauber der Kunst läßt sich keinem Menschen begreiflich machen, der noch niemals in ihrem Bann gestanden hat.

Die Macht aller Wissenschaft hat ihre Ursache darin, daß sie allumfassend ist, ihre Gesetze sind frei von der Willkür einzelner und reflektieren die kollektive Erfahrung, unabhängig von Alter, Nationalität und Stimmung. Das Geheimnis der Kunst dagegen liegt in ihrer Unwiederholbarkeit: Die Intensität ihrer Wirkung hängt von der Summe aller Erfahrungen eines Menschen ab, vom Reichtum seiner Assoziationen, einem Stimmungswechsel, der sich jedem Zugriff entzieht, von einem zufälligen Blick, einem Wort oder einer Berührung — von allem, was die Stärke der Individualität, die Schönheit des Vergänglichen und die Macht des Unwiederholbaren bildet.

Größter Erfolg eines Wissenschaftlers ist die Bestätigung seiner Ergebnisse, d.h. ihre Wiederholung durch ei-

nen anderen zu einem späteren Zeitpunkt. In der Kunst ist jede Wiederholung gleichbedeutend mit dem Tod; der wahre Schauspieler stirbt ihn auf der Bühne jedesmal von neuem.

Es soll Menschen gegeben haben, die Melodien fanden und doch nichts von den Grundregeln der Musik wußten. Diese Melodien mochten ungewohnt klingen, hatten jedoch ihre Daseinsberechtigung, wenn sie nur gefielen. Eine derartige Situation ist in der Wissenschaft undenkbar: Hier existiert das Kriterium der Wahrheit, und das Wort »gefallen« ist im Lexikon der Wissenschaft gestrichen.

In der Wissenschaft werden Wahrheiten bewiesen und Erscheinungen geklärt. In der Kunst werden sie interpretiert; der Kunst sind logische Überlegungen fremd; sie setzt an die Stelle des strengen Beweises die unmittelbare Überzeugungskraft des Eindrucks.

Die Wissenschaft weiß in der Regel stets zu sagen, warum diese Formel brauchbar ist oder jene Theorie nichts taugt. Die Kunst läßt uns den Zauber der Musik, die Eleganz eines Sonetts nur empfinden; sie erklärt nichts.

Die Wissenschaft nahm ihren Anfang, als wir lernten, aus dem Chaos zufälliger Tatsachen einfache Gesetzmäßigkeiten herauszugliedern. Doch nur dort, wo aus der bloßen Addition einfacher und verständlicher Dinge plötzlich und unerwartet die Empfindung eines Wunders reift, dort — und nur dort — beginnt die Kunst.

Die Wissenschaft ist gründlich und hat es nicht eilig; sie kann auf die Lösung ihrer Probleme lange Jahre verwenden und sie oftmals von Generation zu Generation weitergeben. Diesen »Luxus« kann sich die Wissenschaft leisten, denn sie besitzt ein eindeutiges Verfahren zur Aufzeichnung und Aufbewahrung einmal ermittelter Tatsachen. In der Kunst lebt die intuitiv-genaue Welt der Eindrücke stets nur im Augenblick. (»Helden des Augenblicks« nennt man gelegentlich die großen Schauspieler.) Und doch bringt sie im Herzen der Menschen zuweilen eine Saite zum Klingen, die auch nach Jahren nicht verhallt und das gesamte weitere Leben einschneidend beeinflußt. Den Wunsch des alten Faust: »Zum Augenblicke dürft' ich sagen: Verweile doch, du bist so schön!« vermag nur die Kunst mit ihrem Zauber zu erfüllen. Sie kann nach vielen Jahren noch alle Nuancen längst vergessen, geglaubter Gedanken und Emp-

findungen mit erschreckender Deutlichkeit ins Gedächtnis des Menschen zurückrufen.

Trotz aller scheinbaren Zerbrechlichkeit und Unbestimmtheit ihrer Gestalten ist sie beständiger und älter als die Wissenschaft. Das Gilgamesch-Epos und Homers Dichtungen berühren uns noch heute, denn sie betreffen etwas im Menschen, das in Jahrtausenden unverändert wichtig blieb.

Im Gegensatz dazu hat die Wissenschaft Mühe, alle neuen Denkmöglichkeiten festzuhalten, die erst kürzlich erschlossen wurden. Physikbücher aus dem vorigen Jahrhundert zu lesen ist heute nahezu unmöglich, so veraltet sind sie, so sehr hat sich selbst der Stil wissenschaftlichen Denkens seitdem verändert. Die Bedeutung wissenschaftlicher Werke wird nicht an ihrer Langlebigkeit, sondern an ihrer Fruchtbarkeit gemessen: Wenn sie seinerzeit zur Wissenschaftsentwicklung beigetragen haben, waren sie von Wert.

Wir können noch lange alle möglichen Nuancen von Unterschieden zwischen der Kunst und der Wissenschaft herauszufinden suchen — der Gegenstand ist unerschöpflich. Doch der Nutzen dieser Beschäftigung ist zu bezweifeln: In Wahrheit unterscheiden sich Kunst und Wissenschaft nicht im Wesen, sondern nur in den Methoden des Erkennens unserer Umwelt und der menschlichen Natur. Im alten Griechenland unterschied man sie daher auch nicht, sondern bezeichnete beide mit dem Begriff »techne«, was soviel wie »Können«, »Erfahrung« und »Scharfsinn« bedeutete. Von diesem Wort stammt auch unser Begriff »Technik« ab.

Die Dichter träumen schon lange nicht von der Poesie schlechthin, sondern von der »Poesie des Gedankens«. Die Wissenschaftler machen sich ihrerseits daran, die »Poesie der Wissenschaft« zu erläutern. So sind beide endlich aus ihrer Schanze hervorgekommen, um die künstlichen Grenzen zwischen den Bereichen niederzureißen und den alten Streit um die Abkunft der Geschlechter zu begraben. Es hat keinen Sinn, darüber zu streiten, ob die rechte Hand wichtiger ist oder die linke, ungeachtet der Tatsache, daß sich beide unterschiedlich entwickelt haben und verschiedene Tätigkeiten ausüben können.

Der Schauspieler weiß, daß er wahre Meisterschaft nur erreicht, wenn er zuvor die Diktion, die Mimik und die

Gebärde beherrschen lernte. Erst danach vermag er — Talent vorausgesetzt! — aus einfachen und verständlichen Elementen etwas Unwiederholbares und Erstaunliches zu schaffen, ohne freilich im Grunde zu wissen, wie ihm das gelingt.

Auch ein Wissenschaftler, der das Handwerk der Physik beherrscht, ist noch lange kein Physiker, wenn er auf Formeln und Logik allein vertraut.

Alle tiefen Wahrheiten der Wissenschaft erscheinen in ihrer Entstehung paradox und bleiben unerreichbar, solange man sich nur auf Logik und Erfahrung stützt.

Kurzum: Wahre Kunst ohne Wissenschaft ist undenkbar. Aber es ist auch gewiß, daß die Methode der Entdekkung fundamentaler wissenschaftlicher Wahrheiten in den Bereich der Kunst hineingreift. Die Grenzen für die Anwendung der wissenschaftlichen Analyse in der Kunst bleiben jedoch ebenso bestehen, wie es unmöglich ist, die Wissenschaft durch einen einzigen Geistesblitz zu erfassen. Im Prozeß der Erkenntnis unserer Umwelt besteht eine offenkundige Komplementarität wissenschaftlicher und künstlerischer Methoden. Die Alltagsmethode wissenschaftlicher Arbeit ist die Analyse von Tatsachen und die Erklärung ihrer Ursachen oder das Streben, »in den wundersamen Verwandlungen des Zufalls das ewige Gesetz zu finden«. In der Kunst überwiegt dagegen die unbewußte Synthese, die unter den »Verwandlungen des Zufalls« jene einzigen und unwiederholbaren Verwandlungen findet und aus dem »unendlichen Wirbel der Erscheinungen« unfehlbar nur jene auswählt, die uns die Harmonie des Ganzen empfinden lassen.

Das Getöse des sinnlosen Streits um »Physiker« und »Lyriker« ist gerade verhallt. Seine Heftigkeit läßt sich freilich nur mit der ungenügenden Vorbildung der streitenden Parteien erklären. Der schöpferische (nicht jedoch der handwerkliche!) Prozeß in der Physik und in der Poesie ist gleich. So geht der Physiker zunächst oft vom Gesamtbild der Erscheinung aus. Er unterzieht dieses amorphe, vorerst nur gedanklich fixierte, aber doch schon in gewissem Maße ganzheitliche und synthetische Bild einer logischen Analyse. Er zergliedert es in Begriffe, hält es in der Sprache seiner Formeln fest und überprüft es schließlich im Versuch.

Die Folge »Vorstellung—Begriff—Formel« ist bei den

einzelnen Wissenschaftlern unterschiedlich ausgeprägt und nach Stärke, Schnelligkeit und Festigkeit verschieden. Sie wird von allen möglichen Faktoren beeinflußt: vom Entwicklungsweg des Wissenschaftlers, seinen früheren Einfällen und Irrtümern, von seinem Wissen, seinem Sprachgefühl und sogar von seinem Temperament. Manchmal ist diese Folge auch gestört. Manche Wissenschaftler haben nur sehr selten einen besonderen Einfall. Wer jedoch die ganze Folge von Wechselbeziehungen beherrscht, erwirbt auf einer bestimmten Stufe auch die Fähigkeit zur ästhetischen Beurteilung der Ergebnisse. Ausdrücke wie »eine schöne Formel«, »eine brillante Berechnung« oder »eine scharfsinnige Hypothese« klingen hier natürlich und sinnvoll. Kunst ist hier nicht nur der erste Anstoß in der Wissenschaft, sondern auch deren Ergebnis in seiner höchsten Erscheinungsform. Dies alles bedeutet natürlich nicht, daß ein Wissenschaftler nun statt des Integralzeichens einen Violinschlüssel schreibt; nur in schlechten Romanen denken Wissenschaftler, wenn sie Musik hören, daran, daß der Oktave Logarithmen zugrunde liegen.

Die Welt menschlicher Wahrnehmungen ist unendlich vielfältig, aber chaotisch und durch persönliche Erlebnisse gefärbt. Der Mensch versucht nun, seine Eindrücke zu ordnen und sie mit den Eindrücken anderer in Einklang zu bringen. Dazu erfand er die Wissenschaft und schuf er die Kunst. Daraus erklärt sich ihr Ursprung. Beide verbindet das Gefühl des Staunens: Wie entstand diese Formel, dieses Gedicht, diese Theorie oder diese Musik? (»Am Anfang allen Wissens steht das Staunen«, sagte man im Altertum.)

Das Schöpfertum ist seiner Natur nach in allen Künsten und Wissenschaften gleich. Es ist bestimmt durch die Fähigkeit, Tatsachen und Eindrücke aus der Umwelt intuitiv so zu gruppieren, daß sie unserem gefühlsbedingten Bedürfnis nach Harmonie genügen. Ein Mensch empfindet dies jedesmal dann, wenn es ihm gelungen ist, aus dem Chaos äußerer Eindrücke etwas Einfaches und Vollendetes herauszugliedern: aus Marmor eine Statue, aus Worten ein Gedicht und aus Zahlen eine Formel. Die emotionale Befriedigung ist dann auch das erste Kriterium für den Wahrheitsgehalt des Werks. Weitere Prüfungen folgen: in der Wissenschaft durch das Experiment — in der Kunst durch die Zeit.

Die Zukunft der Wissenschaft

Wenn man an die Zukunft der Wissenschaft denkt, so stellt man sich in der Regel eine Welt der Maschinen, Tasten und durchsichtigen Verkleidungen vor, kurz gesagt: eine Welt der Dinge, über die ein Mensch im weißen Kittel gebietet. Damit verfällt man jedoch in den gleichen Fehler, den auch die Mehrzahl der Menschen nach einer flüchtigen Bekanntschaft mit der Quantenmechanik begeht. Was daran in Erstaunen versetzt, sind in der Regel die konkreten, »groben und sichtbaren« Tatsachen: die Atombombe, der Atomeisbrecher und das Atomkraftwerk. Nur sehr wenige kommen auf den Verdacht, daß all diese Erfolge vergleichsweise einfache Folgerungen aus der Quantenmechanik sind. Und nicht sie sind es, die wirklich Anlaß zum Wundern geben, sondern das überwältigend einfache und harmonische System der wissenschaftlichen Ideen der Atomphysik, dank derer der Eisbrecher, das Kraftwerk und leider auch die Bombe möglich wurden.

Niemand kann ohne das Risiko naiver oder übertriebener Vorstellungen von der Zukunft der Wissenschaft sprechen. Die Begrenztheit der wissenschaftlichen Methode in jenen Bereichen, wo sie nicht anwendbar ist, läßt sich leicht beweisen, doch können ihre Möglichkeiten nicht vorhergesagt werden.

Ohne Zweifel ist die wissenschaftliche Art zu denken nur eine der Fähigkeiten des menschlichen Bewußtseins, die sich bislang jedoch noch keineswegs erschöpft hat. Durchaus wahrscheinlich ist, daß der Mensch in Zukunft neue Möglichkeiten der Erkenntnis seiner Umwelt erschließen und seinen eigenen Platz darin auf dieser Grundlage besser verstehen lernen wird. Freilich wird auch dieses neue, vollkommenere Wissen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit alle wichtigsten Ergebnisse der Wissenschaften von heute enthalten.

Man kann lange daran herumrätseln, wie dieses neue Wissen aussehen wird: Der Mensch ist stets zu mehr imstande, als er im Augenblick vermag. Es ist denkbar, daß sich im Menschen mit der Zeit die Fähigkeit zum synthetischen Erkennen, die insbesondere die Weisen der Antike auszeichnete, mit neuer Kraft fortentwickeln wird. Sie ist heute vor dem Hintergrund der Erfolge der wissenschaftlichen Analyse nahezu erloschen. Vielleicht, daß die In-

tuition in Zukunft aus einem Mittel der wissenschaftlichen Vorhersage zu einem Werkzeug des wissenschaftlichen Beweises werden wird. Darin ist nichts Unwahrscheinliches: Wir vertrauen ja auch dem Auge des Diamantensortierers, und doch unterscheidet sich dieses nur durch sein langes Training vom ungeschulten Auge. Vielleicht wird man im Laufe der Zeit genauso lernen, Intuition anzuerziehen und ihre Reproduzierbarkeit bei den verschiedenen Menschen zu erreichen. Solle dies wirklich gelingen, dann werden die Problematik der Nichteindeutigkeit wissenschaftlicher Begriffe und der ganze sperrige Apparat der Logik überhaupt wegfallen. Die Folgen einer derartigen Revolution im Denken sind nicht vorherzusagen.

An Hypothesen über die Zukunft der Wissenschaft ist kein Mangel: Das Angebot ist reichhaltig und erstreckt sich von hemmungslosem Enthusiasmus bis zum finstersten Pessimismus. Die einen prophezeien den baldigen Untergang unserer gesamten Zivilisation wegen der unangemessenen Nutzung jener Kräfte, die gerade durch sie ins Leben gerufen worden sind. Andere glauben, daß die Menschheit selbst dann noch weiterleben wird, wenn eines Tages unsere Sonne erlischt.

Wie immer sich die Menschheit entwickeln möge — wenn sie am Leben bleibt —, sie wird stets mit einem Hauch ehrfurchtsvollen Staunens ihren Blick auf unsere stürmische und eilends voranschreitende Epoche der Wissenschaft richten, genauso wie wir heute an die Epoche der Renaissance oder an die Zeiten der Weisen in der Antike zurückdenken.

Schlußwort

Als ich jung war, hat mich eine Tatsache immer wieder verblüfft: Wie kommt es, daß die Lektüre guter Bücher — ein nichtmaterieller Prozeß — das ganze Erscheinungsbild des Menschen bis zur Unkenntlichkeit verändert: seine Rede, sein Lächeln, den Ausdruck des Gesichts und der Augen, ja sogar Gangart und Gesten? Erst allmählich begriff ich, daß dies eines der wichtigsten und vorderhand ungelösten Rätsel des menschlichen Bewußtseins darstellt.

Als die Nomaden ihre Pferde mit glühendem Eisen zeichneten, wußten sie nicht, daß sein Strahlungsspektrum der Planckschen Formel gehorcht. Wenn sie ihre Pferde in den Fluß trieben, stellten sie sich die Wassermoleküle nicht in Form eines Winkels von 109° 30′ vor. Und wenn sie dann wieder aus dem Fluß herausstiegen, so dachten sie auch nicht darüber nach, daß ihre Körper durch Photonen gebräunt wurden.

Heute, Jahrtausende später, ist in der Natur alles beim alten geblieben: Die Sonne geht jeden Tag im Osten auf, das Wasser in den Flüssen erstarrt von Null Grad Celsius an zu Eis, und glühendes Eisen kühlt sich nach den ewigen Gesetzen der Thermodynamik ab.

Heute wissen wir das alles. Vielleicht hat uns dieses Wissen nicht glücklicher gemacht, doch es ist irreversibel, ein Element der Kultur, die uns von den Frühmenschen unterscheidet und deren Freuden ebenso wie deren Plagen sich heute kaum abschütteln lassen.

Heute droht diese ungeheure Wissenslast die Menschheit zu erdrücken, die dieses Wissen doch erst ins Leben gerufen hat. Man kann häufig geistreiche Sprüche darüber hören, daß die Wissenschaft in eine Sackgasse geraten sei, indem sie sich nämlich rascher entwickele, als man sie zu verstehen imstande sei. Auch hört man, die Wissenschaft sei in tausend Einzelheiten erstickt und habe ihre hohen Ideale verloren. Zu viele Menschen sprechen heute Eliots effektvolle Worte unüberlegt nach: »Wir vergaßen

die Weisheit um des Wissens willen, und wir verloren das Wissen im Strom der Information.«

Derartige Überlegungen imponieren müden oder enttäuschten Leuten sehr. Doch was helfen Klagen? Stets findet der forschende Mensch aus dem Chaos der Tatsachen und Meinungen die objektiven Gesetzmäßigkeiten, nach denen sich alle Prozesse in der Natur und in der Gesellschaft vollziehen. Und das wird auch so bleiben, solange die Menschheit existiert.

Ich wünsche mir, daß alle, die dieses Buch bis zum Ende gelesen haben, mit mir jene Freude und jenes Erstaunen teilen, das ich selbst einmal empfand, als ich meine ersten Erkenntnisse in der ungewöhnlichen Welt der Quantenmechanik suchte.